

**UNIVERSIDADE DO MINHO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**



# **ESTRUTURAS INTELIGENTES UTILIZANDO BETÃO E POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO**

**BRUNO JOEL MARTINS DA SILVA**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO MINHO PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – PROCESSOS E GESTÃO DA CONSTRUÇÃO**

**GUIMARÃES, MARÇO DE 2005**

## **AGRADECIMENTOS**

---

Este trabalho deve muito a algumas pessoas, às quais, por diferentes razões, gostaria de agradecer pessoalmente.

Ao meu orientador, Professor Said Jalali, pela sua paciência e ensinamentos, sendo um interlocutor disposto a oferecer estímulos e principalmente, a percorrer novos caminhos, ouvir com interesse e ânimo todas as questões, dúvidas e problemas que surgiram ao longo deste trabalho. Pela confiança depositada, e por tudo quanto aprendi, os meus mais profundos agradecimentos.

Ao colega Miguel Ferreira, pela preciosa ajuda e pelas suas valiosas sugestões. Um abraço.

A todos os colegas do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pretendo manifestar a minha gratidão por todo o apoio, ajuda e dedicação. Em particular, agradeço ao Sr. Matos e ao Sr. Rui toda a disponibilidade demonstrada.

Agradeço igualmente ao Professor José Gonzalez do Instituto Politécnico da Guarda todo o apoio e conhecimentos transmitidos.

Aos meus amigos, para todos aqueles que de uma forma ou outra me apoiaram, incentivaram e partilharam alguns dos meus problemas, muito obrigado. Para o João Durães e José Mário Correia, em particular, um grande abraço.

À minha família, por todo o apoio, incentivo e carinho. Obrigado pela vossa compreensão.

À instituição FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, pelo financiamento através da Bolsa de Investigação com a referência POCTI/40718/BI/1/2002, o meu profundo agradecimento.

A todos agradeço e dedico o resultado deste trabalho.

*Eu não sei o que é a inspiração. Mas também a verdade é que às vezes nós usamos conceitos que nunca paramos a examinar. Vamos lá a ver: imaginemos que eu estou a pensar determinado tema e vou andando, no desenvolvimento do raciocínio sobre esse tema, até chegar a uma certa conclusão. Isto pode ser descrito, posso descrever os diversos passos desse trajecto, mas também pode acontecer que a razão, em certos momentos, avance por saltos; ela pode, sem deixar de ser razão, avançar tão rapidamente que eu não me aperceba disso, ou só me aperceba quando ela tiver chegado ao ponto a que, em circunstâncias diferentes, só chegaria depois de ter passado por todas essas fases.*

*Talvez, no fundo, isso seja inspiração, porque há algo que aparece subitamente; talvez isso possa chamar-se também intuição, qualquer coisa que não passa pelos pontos de apoio, que saltou de uma margem do rio para a outra, sem passar pelas pedrinhas que estão no meio e que ligam uma à outra. Que uma coisa a que nós chamamos razão funcione desta maneira ou daquela, que funcione com mais velocidade ou que funcione de forma mais lenta e que eu posso acompanhar o próprio processo, não deixa de ser um processo mental a que chamamos razão.*

*José Saramago, in 'Diálogos com José Saramago'*

## RESUMO

---

O investimento em infraestruturas de engenharia civil sofreu um crescimento acentuado nas últimas décadas, representando de um modo geral os investimentos mais dispendiosos das nossas sociedades.

Durante anos, a manutenção das construções nunca foi devidamente equacionada. No entanto, o desempenho de muitas dessas construções tem vindo a diminuir, podendo inclusive reduzir a segurança até à ruína de forma inadmissível em termos sócio-económicos, sendo os proprietários e organismos responsáveis confrontados com a necessidade de estabelecer programas de reabilitação que exigem orçamentos avultados.

O evitar da degradação dessas estruturas até níveis insustentáveis poderá passar pelo maior controlo de execução da obra, pelo recurso a materiais mais duráveis e pela implementação de sistemas de monitorização.

Recorrendo à tecnologia disponível, é possível monitorizar uma série de parâmetros fundamentais, quer ao nível do comportamento mecânico, quer ao nível da integridade e durabilidade dos materiais. A generalização do uso da monitorização poderá passar pelo recurso a materiais inteligentes. Estes materiais podem ser obtidos a partir de elementos introduzidos na composição de materiais correntes, ou mesmo recorrendo a materiais convencionais, através do estudo de certas características tais como as propriedades eléctricas.

Neste trabalho, estudou-se a resistividade eléctrica do betão simples e do betão reforçado com fibras de carbono (CFRC), de forma a averiguar a possibilidade de monitorizar certos parâmetros que influenciam a durabilidade das construções.

Neste sentido, efectuou-se uma campanha de ensaios laboratoriais com o objectivo de aferir a capacidade deste material constituir uma “Estrutura Inteligente”.

Constatou-se que a temperatura influencia o valor da resistividade do betão. Com base nos ensaios elaborados, estabeleceu-se uma relação entre a temperatura e a resistividade a partir da equação de Arrhenius, permitindo converter um determinado valor de resistividade medido a uma determinada temperatura positiva, para um valor de resistividade a uma temperatura de referência.

Estabeleceu-se uma relação entre a resistência à compressão e a evolução da resistividade eléctrica do betão simples e CFRC, permitindo estimar a tensão de rotura à compressão com base no valor da resistividade eléctrica. A aplicação de métodos consagrados para determinar a evolução da resistência do betão com a idade mostrou-se aplicável à evolução da resistividade com a idade. Com base nestes métodos, foi possível estimar a resistência à compressão do betão aos 28 dias com base nas leituras de resistividade até aos 7 dias, de forma não destrutiva.

Estudou-se a influência da presença de cloretos na resistividade eléctrica do betão simples e CFRC, concluindo que aparentemente, a presença de cloretos no betão não altera de forma significativa a sua resistividade, não sendo possível estabelecer uma relação com aplicação prática para os valores de concentração de cloretos indicados nas normas em vigor.

Foram realizados ensaios *CTH – Rapid Method* onde se registou a evolução da resistividade do provete, assim como da temperatura. Concluiu-se que neste tipo de ensaios, o aumento da temperatura do provete causado pela passagem da corrente eléctrica deturpa o valor da resistividade e da intensidade da corrente, pelo que é proposto o cálculo da resistividade para uma temperatura constante de referência.

Por fim, construiu-se um novo tipo de sensor, robusto e de baixo custo, a partir de um polímero reforçado com fibras de carbono. O sensor mostrou grande aptidão para funcionar como instrumento de medição de deformações em solos submetidos a carregamento.

## ABSTRACT

---

The investment in civil engineering infrastructure has suffered a gradual increase in the last few decades, usually representing the largest investments societies make.

For many years, the maintenance of structures was never properly considered. As a result, the performance of these constructions has diminished up to a point where it has become unacceptable from a social-economical point of view. The owners and entities responsible for the structures are faced with the need to implement highly expensive rehabilitation programs.

Avoiding such levels of degradation can be obtained by greater quality control during construction, the use of more durable materials and by implementing monitorization systems.

Using currently available technology, it is possible to monitor a series of fundamental parameters, regarding both the mechanical properties and the durability properties of the materials. The generalized use of monitorization could become a reality through the use of intelligent materials. These materials are obtained by either adding special elements to a concrete mixture, or by using conventional materials and the study of their electrical properties.

In this research, the electrical resistivity of simple concrete reinforced with carbon fibres (CFRC) was studied so as to evaluate the possibility of monitoring certain parameters that influence the durability of constructions. A test program was developed to evaluate the possibility that this material constitutes an "intelligent" one.

It was observed that the temperature has a large influence on the electrical resistivity of concrete. Based on test results, a relationship was established based on the Arrhenius equation that allows the conversion of an electrical resistivity value at a given temperature into another at a standard temperature.

A relationship between the compressive strength and the electrical resistivity of simple concrete and CFRC was established, allowing the estimation of the compressive strength based on the electrical resistivity value. The use of well known method for predicting the strength with age has shown to be applicable to resistivity as well. Based on these methods, it was possible to estimate the compressive resistance of concrete at 28 day based on the values of electrical resistivity for 7 days.

It was noted that the presence of chlorides in the cementitious matrix apparently does not influence significantly the value electrical resistivity in plain concrete and in concrete reinforced with carbon fibres. Therefore, it was not possible to establish a relationship for a practical application of predicting the chloride concentration in concrete.

It was concluded that, for the non-stationary migration tests where the electrical resistivity and the temperature of the specimen were measured, the increase in temperature resulting from the passing current affects the electrical resistivity and the current intensity. Therefore, a proposal for the calculation of the electrical resistivity at a constant reference temperature is given.

In conclusion, a low cost, robust sensor was built based on polymer reinforced carbon fibres. The sensor has shown great aptitude to perform as an instrument to measure deformations in soils subject to loads

## OBJECTIVOS

---

O conceito de “Estrutura Inteligente” pretende satisfazer simultaneamente os requisitos de monitorização da estrutura e simplicidade de utilização e interpretação dos dados, sem provocar qualquer impacto ou alteração na concepção da estrutura e sua utilização.

No âmbito deste trabalho, define-se “Estrutura Inteligente” como aquela que aborda quatro vertentes essenciais:

1. Poder prever a vida útil da estrutura em termos de durabilidade do betão armado;
2. Poder prever o aumento da resistência à compressão do betão com a idade;
3. Medir as deformações *in situ*, decorrentes da aplicação de cargas nos solos de fundação;
4. Medir as tensões instaladas nas estruturas;

A fim de estudar a possibilidade de implementar numa estrutura as quatro vertentes acima referidas, estabelecem-se como objectivos deste trabalho os seguintes:

- a. Poder avaliar a vida útil das estruturas em condições de exposição à presença de cloretos que ocorre nas zonas costeiras;
- b. Avaliar a possibilidade de prever o endurecimento do betão com o aumento da resistividade eléctrica, a fim de criar um novo método não destrutivo que permita conhecer a sua resistência à compressão;
- c. Estudar a possibilidade de criar um sensor para monitorizar assentamentos das fundações. O sensor a desenvolver deverá ser de baixo custo, robusto e com a fiabilidade adequada;
- d. Estudar o efeito da temperatura na resistividade eléctrica de argamassas simples e com fibras de carbono;

A metodologia seguida começou por fazer uma análise crítica dos conhecimentos já publicados sobre os objectivos deste trabalho.

Seguidamente foi elaborado e levado a cabo um plano de ensaios laboratoriais a fim de atingir os objectivos propostos.

## ÍNDICE RESUMIDO

---

<b>CAPÍTULO 1 – ESTRUTURAS INTELIGENTES</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 – BETÕES REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO</b>	<b>26</b>
<b>CAPÍTULO 3 – A RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DO BETÃO</b>	<b>41</b>
<b>CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E COMPOSIÇÕES UTILIZADAS</b>	<b>59</b>
<b>CAPÍTULO 5 – O EFEITO DA TEMPERATURA NA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DA ARGAMASSA</b>	<b>67</b>
<b>CAPÍTULO 6 – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO BETÃO COM BASE NA SUA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA</b>	<b>78</b>
<b>CAPÍTULO 7 – PREVISÃO DA PRESENÇA DE CLORETOS NO BETÃO COM BASE NO VALOR DA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA</b>	<b>96</b>
<b>CAPÍTULO 8 – POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO PARA MEDIR ASSENTAMENTOS DE FUNDAÇÕES</b>	<b>104</b>
<b>CAPÍTULO 9 – CONCLUSÕES GERAIS</b>	<b>112</b>
<b>CAPÍTULO 10 – REFERÊNCIAS</b>	<b>116</b>

## ÍNDICE

---

### ***CAPÍTULO 1***

#### **ESTRUTURAS INTELIGENTES**

<b>1.1 GENERALIDADES</b>	<b>2</b>
<b>1.2 PARÂMETROS MONITORIZÁVEIS</b>	<b>7</b>
1.2.1 MONITORIZAÇÃO DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES	7
1.1.2 MONITORIZAÇÃO DE CORROSÃO DE ARMADURAS	11
1.2.2.1 MEDIDAS ELECTROQUÍMICAS DO AÇO	14
1.2.2.2 MEDIDAS FÍSICO-QUÍMICAS NO BETÃO	16
1.2.3 MONITORIZAÇÃO DA TEMPERATURA	18
1.2.4 MONITORIZAÇÃO DA FISSURAÇÃO DO BETÃO	19
1.2.5 MONITORIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	20
1.2.6 MONITORIZAÇÃO DA VIBRAÇÃO DE UMA ESTRUTURA	20
1.2.7 MONITORIZAÇÃO DE OBRAS GEOTÉCNICAS	20
<b>1.3 MATERIAIS INTELIGENTES</b>	<b>23</b>
<b>1.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS</b>	<b>24</b>

### ***CAPÍTULO 2***

#### **BETÕES REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO**

<b>2.1 GENERALIDADES</b>	<b>27</b>
<b>2.2 PRODUÇÃO DAS FIBRAS DE CARBONO</b>	<b>30</b>
<b>2.3 ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DAS FIBRAS DE CARBONO</b>	<b>32</b>
<b>2.4 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE CARBONO</b>	<b>35</b>
<b>2.5 BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO (CFRC)</b>	<b>37</b>
2.5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CFRC	38
2.5.2 CFRC APLICADO A ESTRUTURAS INTELIGENTES	39
<b>2.6 CONSIDERAÇÕES GERAIS</b>	<b>40</b>

### ***CAPÍTULO 3***

#### **A RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DO BETÃO**

<b>3.1 GENERALIDADES</b>	<b>42</b>
<b>3.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DO BETÃO</b>	<b>43</b>
<b>3.3 FACTORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DO BETÃO</b>	<b>47</b>
3.3.1 TIPO DE CIMENTO E DOSAGEM	47
3.3.2 RAZÃO ÁGUA/CIMENTO	48
3.3.3 TIPO DE AGREGADO	49
3.3.4 ADIÇÕES	51



3.3.5 ADJUVANTES	52
3.3.6 CLORETOS	53
3.3.7 PRÁTICAS CONSTRUTIVAS	54
3.3.8 TEMPERATURA	54
3.3.9 HUMIDADE	55
<b>3.4 A RESISTIVIDADE DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO</b>	<b>56</b>
<b>3.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS</b>	<b>58</b>

## ***CAPÍTULO 4***

### **MATERIAIS E COMPOSIÇÕES UTILIZADAS**

<b>4.1 MATERIAIS UTILIZADOS</b>	<b>60</b>
4.1.1 CIMENTO PORTLAND DE CALCÁRIO	60
4.1.2 AGREGADO GROSSO	61
4.1.3 AGREGADO FINO	61
4.1.4 ÁGUA	61
4.1.5 FIBRAS DE CARBONO	63
4.1.6 POLÍMERO	63
<b>4.2 ESTUDO DAS COMPOSIÇÕES UTILIZADAS</b>	<b>63</b>
4.2.1 ARGAMASSA	64
4.2.2 BETÃO	65
4.2.3 FABRICO DE AMASSADURAS E CURA	65

## ***CAPÍTULO 5***

### **O EFEITO DA TEMPERATURA NA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DA ARGAMASSA**

<b>5.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>68</b>
<b>5.2 METODOLOGIA UTILIZADA</b>	<b>68</b>
<b>5.3 RESULTADOS OBTIDOS</b>	<b>71</b>
<b>5.4 ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>72</b>
<b>5.5 CONCLUSÃO</b>	<b>76</b>

## ***CAPÍTULO 6***

### **PREVISÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO BETÃO COM BASE NA SUA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA**

<b>6.1 INTRODUÇÃO</b>	<b>79</b>
<b>6.2 METODOLOGIA UTILIZADA</b>	<b>79</b>
<b>6.3 RESULTADOS OBTIDOS</b>	<b>79</b>
6.3.1 BETÃO SIMPLES	79
6.3.2 BETÃO COM FIBRAS DE CARBONO (CFRC)	80
6.3.3 COMPARAÇÃO ENTRE A EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E RESISTIVIDADE	81

<b>6.4 ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	82
6.4.1 MODELOS MATEMÁTICOS	83
6.4.1.1 MÉTODO EMPÍRICO	83
6.4.1.2 MÉTODO TEÓRICO	87
<b>6.5 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO AOS 28 DIAS COM BASE NOS VALORES DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA INICIAIS</b>	93
<b>6.6 CONCLUSÃO</b>	95
 <b>CAPÍTULO 7</b>	
<b>PREVISÃO DA PRESENÇA DE CLORETOS NO BETÃO COM BASE NO VALOR DA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA</b>	
<b>7.1 INTRODUÇÃO</b>	97
<b>7.2 METODOLOGIA UTILIZADA</b>	97
<b>7.3 RESULTADOS OBTIDOS</b>	98
7.3.1 ENSAIOS EM PROVETES CÚBICOS	98
7.3.1.1 BETÃO SIMPLES	98
7.3.1.2 BETÃO COM FIBRAS DE CARBONO	98
7.3.1.3 ANÁLISE DE RESULTADOS	99
7.3.2 ENSAIOS EM PROVETES CILÍNDRICOS	99
7.3.2.1 ANÁLISE DE RESULTADOS	102
<b>7.4 CONCLUSÃO</b>	102
 <b>CAPÍTULO 8</b>	
<b>POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO PARA MEDIR ASSENTAMENTOS DE FUNDAÇÕES</b>	
<b>8.1 INTRODUÇÃO</b>	105
<b>8.2 CONSTRUÇÃO DO SENSOR</b>	106
<b>8.3 DESEMPENHO DO SENSOR</b>	106
<b>8.4 CALIBRAÇÃO DO SENSOR</b>	108
<b>8.5 AVALIAÇÃO DO SENSOR EM SOLO</b>	109
<b>8.6 RESULTADOS OBTIDOS</b>	110
<b>8.7 CONCLUSÃO</b>	111
 <b>CAPÍTULO 9</b>	
<b>CONCLUSÕES GERAIS</b>	
<b>9.1 CONCLUSÕES GERAIS</b>	113
 <b>CAPÍTULO 10</b>	
<b>REFERÊNCIAS</b>	
<b>10.1 REFERÊNCIAS</b>	117

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Ruína da Barragem de Teton, Estados Unidos – 1976	4
Figura 2	Colapso da Ponte de Entre-Os-Rios, Portugal – 2001	4
Figura 3	Ruína de parte do terminal 2E do Aeroporto Charles de Gaulle, França 2004	5
Figura 4	O processo de monitorização	7
Figura 5	Extensómetro para medir deformações em armaduras	8
Figura 6	Extensómetro para medir deformações no betão	8
Figura 7	Sistema de aquisição de dados	9
Figura 8	Colocação de sensores numa viga pré fabricada	9
Figura 9	Sensores LVTD's	9
Figura 10	Aplicação de sensores de Bragg em Fibra Óptica	10
Figura 11	Exemplo de armaduras corroídas em estruturas de betão armado	12
Figura 12	Esquema da corrosão electroquímica na presença de cloro	13
Figura 13	Fissuração/destacamento do betão devido à corrosão das armaduras	13
Figura 14	Extracção de amostras em pó do betão	17
Figura 15	Exemplo de um perfil de penetração de cloretos no interior do betão	17
Figura 16	Exemplo de termopar	18
Figura 17	Instrumentação de uma fissura com “crack meter”	19
Figura 18	“Crack Meter”	19
Figura 19	Exemplo de piezómetros	22
Figura 20	Instalação de um inclinómetro	22
Figura 21	Sensor de Viga	22
Figura 22	Exemplo de extensómetro de furo	22
Figura 23	Células de assentamento pneumáticas	23
Figura 24	Células de carga	23
Figura 25	Comparação entre as linhas de tensão em betão fissurado sem fibra e com fibra	29
Figura 26	Modelo de estrutura de fibra de carbono proposto por Johnson e Tyson	33
Figura 27	Modelo da estrutura de fibras de carbono proposto por Ruland	34
Figura 28	Modelos de estruturas transversais de fibras de material tipo PAN e pitch	34
Figura 29	Organograma que reúne as principais propriedades, características e aplicações das fibras de carbono	36
Figura 30	Resistividade eléctrica de alguns materiais	44
Figura 31	Efeito da razão a/c na resistividade do betão	49
Figura 32	A influência da razão a/c e do grau de saturação na resistividade	50
Figura 33	Efeito da adição de cinzas volantes na resistividade do betão	51
Figura 34	Efeito da adição de sílica de fumo na resistividade do betão	52
Figura 35	Efeito do grau de saturação e da razão a/c na resistividade eléctrica do betão	55

Figura 36	Relação entre a Intensidade e a Força. Betão com Fibra (1%)	57
Figura 37	Relação entre a Intensidade e o deslocamento. Betão com Fibra (1%)	57
Figura 38	Areia utilizada	62
Figura 39	Análise granulométrica dos agregados utilizados	62
Figura 40	Polímero utilizado (catalizador e base)	63
Figura 41	Provete prismático de argamassa	64
Figura 42	Provete prismático parcialmente destruído	64
Figura 43	Provete cúbico de betão	65
Figura 44	Misturadora utilizada para o fabrico das amassaduras	66
Figura 45	Equipamento utilizado para temperaturas inferiores a 10 °C	68
Figura 46	Equipamento utilizado para temperaturas superiores a 10°C	69
Figura 47	Circuito eléctrico para medir a resistência eléctrica do betão / argamassa	69
Figura 48	Variação da resistividade com a temperatura em provetes simples	72
Figura 49	Variação da resistividade com a temperatura em provetes com fibra	72
Figura 50	Comparação entre as leituras de resistividade em provetes simples e com fibras	73
Figura 51	Aplicação da Lei de Arrhenius à resistividade de argamassa simples	74
Figura 52	Aplicação da Lei de Arrhenius à resistividade de argamassa com fibra	74
Figura 53	Aplicação da Lei de Arrhenius a provetes simples – temperaturas positivas	75
Figura 54	Aplicação da Lei de Arrhenius a provetes com fibra – temperaturas positivas	75
Figura 55	Relação entre a temperatura e a condutividade eléctrica	77
Figura 56	Variação da resistência mecânica com a idade de provetes de betão simples	80
Figura 57	Variação da resistividade eléctrica com a idade de provetes de betão simples	80
Figura 58	Variação da resistência mecânica com a idade de provetes de CFRC	81
Figura 59	Variação da resistividade eléctrica com a idade de provetes de CFRC	81
Figura 60	Evolução da resistência mecânica e da resistividade de provetes de betão simples	81
Figura 61	Evolução da resistência mecânica e da resistividade de provetes de CFRC	82
Figura 62	Correlação entre a resistividade e a resistência à compressão do betão simples	82
Figura 63	Correlação entre a resistividade e a resistência à compressão do CFRC	83
Figura 64	Previsão da resistência mecânica do betão – método empírico (BS)	84
Figura 65	Previsão da resistividade do betão – método empírico (BS)	84
Figura 66	Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à compressão para betão simples baseada no método empírico	85
Figura 67	Previsão da resistência mecânica do betão – método empírico (CFRC)	86
Figura 68	Previsão da resistividade do betão – método empírico (CFRC)	86
Figura 69	Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à compressão para CFRC baseada no método empírico	87
Figura 70	Previsão da resistência mecânica do betão – modelo teórico (BS)	88
Figura 71	Previsão da resistividade do betão – modelo teórico (BS)	89

Figura 72	Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à compressão para betão simples – modelo teórico	90
Figura 73	Previsão da resistência mecânica do betão – modelo teórico (CFRC)	90
Figura 74	Previsão da resistividade do betão – modelo teórico (CFRC)	91
Figura 75	Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à compressão para betão com fibras – modelo teórico	92
Figura 76	Valores de resistência à compressão medidos e calculados – BS	92
Figura 77	Valores de resistência à compressão medidos e calculados – CFRC	92
Figura 78	Valores de resistividade medidos e calculados – BS	93
Figura 79	Valores de resistividade medidos e calculados – CFRC	93
Figura 80	Variação do erro na previsão da resistência mecânica aos 28 dias com base nas idades utilizadas na medição da resistividade – utilização do método empírico (BS)	94
Figura 81	Variação da resistividade com a idade e com o teor em Cloretos em provetes de betão simples	98
Figura 82	Variação da resistividade com a idade e com o teor em Cloretos em provetes de betão com fibra	99
Figura 83	Ensaio CTH Rapid Method	99
Figura 84	Evolução da resistência eléctrica durante o ensaio CTH – Betão Simples	100
Figura 85	Evolução da temperatura do provete durante o ensaio CTH – Betão Simples	100
Figura 86	Variação relativa da Resistência e da Temperatura durante o Ensaio CTH – Betão simples	100
Figura 87	Variação relativa da Resistência e da Temperatura durante o Ensaio CTH – Betão Com Fibras de Carbono	101
Figura 88	Evolução da resistência eléctrica durante o ensaio CTH para uma temperatura constante igual a 21°C – betão simples	101
Figura 89	Evolução da resistência eléctrica durante o ensaio CTH para uma temperatura constante igual a 21°C – betão com fibras de carbono	101
Figura 90	Exemplo de anomalias em edifícios devido a problemas de assentamentos excessivos	105
Figura 91	Sensor em polímero com fibras de carbono para medir assentamentos	106
Figura 92	Ensaio de carga / descarga ao sensor para aferir o seu desempenho e multímetro utilizado	107
Figura 93	Ensaio carga / descarga sobre o sensor	107
Figura 94	Ensaio carga / descarga com patamar sobre o sensor	107
Figura 95	Ciclo de carga para calibrar o sensor	108
Figura 96	Relação entre a resistência eléctrica do sensor e a sua deformação	108
Figura 97	Compactação do solo dentro do recipiente e colocação do sensor	109
Figura 98	Montagem do equipamento para a realização do ensaio	109
Figura 99	Sistema de aquisição de dados	109
Figura 100	Ciclos de carga realizados	110
Figura 101	Deslocamentos obtidos através dos LVDT's instalados e a partir do sensor construído	110

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	Tipos de Fibras de Carbono	35
Tabela 2	O desempenho dos compósitos de diferentes fibras, expresso em forma de resistência à flexão e tenacidade	39
Tabela 3	Critérios de probabilidade de corrosão em função da resistividade do betão	42
Tabela 4	Absorção de água e resistividade de vários tipos de agregados	50
Tabela 5	Parâmetros das rectas de ajustamentos	57
Tabela 6	Composição química do cimento utilizado	60
Tabela 7	Propriedades físicas do cimento utilizado	60
Tabela 8	Componentes potenciais do cimento utilizado	61
Tabela 9	Propriedades Mecânicas do cimento utilizado	61
Tabela 10	Análise granulométrica dos agregados, % de material passado	62
Tabela 11	Características físicas da fibra utilizada	63
Tabela 12	Composição das argamassas utilizadas	64
Tabela 13	Constituição do betão	65
Tabela 14	Resistividade eléctrica de provetes com fibra	71
Tabela 15	Resistividade eléctrica de provetes simples	71
Tabela 16	Evolução da resistência mecânica e da resistividade de provetes de BS	79
Tabela 17	Evolução da resistência mecânica e da resistividade de provetes de CFRC	80
Tabela 18	Resistência mecânica – aplicação do método empírico (BS)	83
Tabela 19	Aplicação do método empírico à resistividade (BS)	84
Tabela 20	Determinação da resistência e da resistividade com base nos modelos empíricos (BS)	85
Tabela 21	Resistência mecânica – aplicação do método empírico (CFRC)	85
Tabela 22	Aplicação do método empírico à resistividade (CFRC)	86
Tabela 23	Determinação da resistência e da resistividade com base nos modelos empíricos (CFRC)	87
Tabela 24	Resistência mecânica – aplicação do método teórico (BS)	88
Tabela 25	Resistividade – aplicação do modelo teórico (BS)	88
Tabela 26	Determinação da resistência e da resistividade com base nos modelos teóricos (BS)	89
Tabela 27	Resistência mecânica – aplicação do modelo teórico (CFRC)	90
Tabela 28	Resistividade – aplicação do modelo teórico (CFRC)	91
Tabela 29	Determinação da resistência e da resistividade com base nos modelos teóricos (CFRC)	91
Tabela 30	Teor máximo de cloretos do betão segundo a NP ENV 206	97
Tabela 31	Dosagens de NaCl utilizadas	97
Tabela 32	Valores de resistividade em provetes de betão simples com vários teores de cloretos – BS	98
Tabela 33	Valores de resistividade em provetes de betão com fibras com vários teores de cloretos – CFRC	98

## INTRODUÇÃO

---

As obras de engenharia civil correspondem, de um modo geral, aos investimentos mais dispendiosos das nossas sociedades. Nos países desenvolvidos, o investimento em infraestruturas de engenharia sofreu um crescimento acentuado nas últimas décadas. No entanto, o desempenho de muitas dessas estruturas tem vindo a diminuir, afectando substancialmente a exploração e manutenção das construções, podendo reduzir a segurança até ao colapso de forma inadmissível em termos sócio-económicos.

Durante anos, a manutenção das obras nunca foi devidamente equacionada, sendo agora os proprietários e organismos responsáveis pela sua exploração confrontados com a necessidade de estabelecer programas de reabilitação que exigem orçamentos avultados.

O processo de determinar a integridade estrutural e material é geralmente referido como monitorização estrutural (Structural Health Monitoring - SHM). A monitorização da integridade estrutural e material apresenta-se assim, como uma extensão das regras de avaliação e inspecção existentes, sendo de facto, um avanço significativo em relação à prática corrente, não só pelo uso de tecnologia avançada, mas também pela integração efectiva destas tecnologias num sistema inteligente que ajuda na tomada de decisão. A monitorização durante a fase de construção, é igualmente fundamental, de forma a garantir a segurança e confiança na utilização de uma nova técnica construtiva. Actualmente os sistemas de monitorização são sistemas constituídos por microprocessadores e computadores, permitem a aquisição, armazenamento e análise de dados, obtidos através de sensores instalados em obra.

A instrumentação e monitorização de estruturas continua no entanto a ser um tema pouco difundido, reservado a uma área muito restrita das obras de engenharia civil, sendo aplicado unicamente a um tipo de obra muito específico, de grande envergadura ou complexidade. Tal deve-se sobretudo, aos custos associados à instalação e implementação de um sistema de monitorização, que pressupõem a instalação de uma série de instrumentos de medição cujo manuseamento e instalação em obra apenas poderá ser efectuado por técnicos altamente especializados. Trata-se de uma série de sensores delicados, que facilmente podem ser danificados na realização das diversas actividades inerentes à concretização de uma obra, como a utilização de equipamentos pesados e o recurso a mão-de-obra pouco qualificada.

O recurso a “materiais inteligentes” poderá ser num futuro próximo, uma possibilidade credível para monitorizar estruturas. Estes materiais apresentam propriedades físicas invulgares que podem ser exploradas com o propósito de monitorização, permitindo minimizar os custos de exploração e manutenção da estrutura, devido à capacidade de traduzirem em tempo real o seu estado de degradação.

Gonzalez [14] estudou o comportamento do Betão Reforçado com Fibras de Carbono – CFRC , concluindo que este material permite medir as variações de tensões mecânicas a partir das modificações na resistividade eléctrica deste compósito, exibindo portanto comportamento “inteligente”.

No âmbito deste trabalho, pretende-se estudar a potencialidade do Betão Simples e CFRC constituir um “material inteligente”, nomeadamente quanto à capacidade de monitorizar *in situ*, a evolução da sua resistência à compressão e a presença de agentes nocivos tais como cloretos, de forma não destrutiva.

Pretende-se igualmente desenvolver um novo tipo de sensor, capaz de medir deformações e tensões à semelhança de um sensor tradicional, mas apresentando-se como um instrumento versátil, robusto, de fácil instalação e utilização.

Este trabalho apresenta-se dividido em dez capítulos, sendo que nos três primeiros, de índole mais teórico, pretende-se abordar algumas matérias fundamentais relacionadas com este tema, tais com as *estruturas inteligentes, betões reforçados com fibras de carbono e a resistividade eléctrica do betão*, sendo este parâmetro de importância primordial no âmbito deste trabalho.

De seguida, descreve-se os materiais e composições utilizadas, apresentando-se depois as diversas campanhas de ensaios efectuadas de forma a atingir os objectivos propostos, nomeadamente o estudo da influência da temperatura na variação da resistividade eléctrica do betão, a possibilidade de prever a resistência mecânica com base no valor da resistividade eléctrica, aferir a presença de cloretos no betão a partir da sua resistividade eléctrica e finalmente, averiguar a possibilidade de construir um novo tipo de sensor, mais económico e robusto que os tradicionais, utilizando polímero com inclusão de fibras de carbono, a fim de medir assentamentos em solos de fundação. São apresentados e discutidos os resultados obtidos.

Por fim, apresentam-se as conclusões gerais e as referências utilizadas.



---

## **ESTRUTURAS INTELIGENTES**

### *Capítulo Um*

## 1.1 GENERALIDADES

A expressão *estruturas inteligentes*, refere-se a sistemas estruturais inspirados em modelos naturais tais como o sistema nervoso humano. Os sistemas naturais apresentam admiráveis qualidades que as estruturas inteligentes procuram imitar: precisão, eficácia, funcionalidade, durabilidade e adaptabilidade. Outros termos são também utilizados para descrever esta matéria, como estruturas multifuncionais ou estruturas adaptativas.

Para ostentar todas essas qualidades, as estruturas inteligentes utilizam três elementos básicos:

- I. Sensores que monitorizam informações internas e externas;
- II. Actuadores que realizam trabalho ou aplicam forças;
- III. Sistemas de controlo central que tomam decisões e expedem ordens;

A combinação dessas propriedades confere inteligência ao sistema. Tais estruturas não armazenam apenas informações e executam tarefas, mas também percebem alterações e adaptam-se de acordo com elas.

Objectivos e exigências	Perspectivas das tecnologias inteligentes
Grande fiabilidade, eficácia e viabilidade da estrutura, assim como do sistema em conjunto.	Novos materiais e dispositivos de aquisição de dados.
Elevado grau de segurança das infra-estruturas, em particular quando submetidas a condições extremas.	Novos materiais e dispositivos de actuação.
Total integração de todas as funções do sistema.	Novos dispositivos e técnicas de controlo.
Controlo permanente da integridade e da “saúde” da estrutura.	Função de auto-deteccção, auto-diagnóstico, auto-correcção e auto-controlo para materiais e sistemas inteligentes.
Deteccção de danos e auto-arranjo.	

Sistemas inteligentes para aplicação científica [1]

A utilização otimizada de uma determinada construção requer uma constante monitorização dos diferentes parâmetros que constituem a base ambiental do sistema:

temperatura, humidade, luminosidade e outros. A automação pode ainda ser mais profunda, actuando também sobre o estado de serviço dos diferentes componentes funcionais da própria construção, entre eles a estrutura. Se para um edifício corrente de habitação não será este um aspecto que requeira atenção especial, já o mesmo tem aplicabilidade a edifícios industriais como centrais nucleares, obras de arte especiais, obras marítimas, barragens e túneis, para citar os mais importantes. Nestes casos danos estruturais podem conduzir a estragos de reparação a custos elevados e, não raro, a situações de inoperacionalidade e mesmo ruína. A instrumentação de estruturas também poderá ser utilizada para validar considerações tomadas na fase de projecto acerca do comportamento dos materiais, da estrutura e do próprio solo.

Por este motivo, sempre que a importância da construção o justifique, é implementado um sistema de monitorização, para precaver situações irreversíveis e intervir enquanto a evolução dos danos ainda se encontra numa fase primária, sendo possível com custos reduzidos reparar uma situação que conduziria inevitavelmente a um estado de não funcionalidade.

A monitorização deve obedecer a várias características, nomeadamente [55]:

- Custos reduzidos;
- Facilidade de utilização e simplicidade do equipamento de medição;
- Não interferir com a funcionalidade da estrutura;
- Capacidade de detecção numa extensa gama da grandeza objecto de investigação;
- Fiabilidade e capacidade de resposta sempre que lhe é aplicado um estímulo;
- Operacionalidade do sensor coincidente com a vida útil da estrutura, ao que corresponde requisitos de durabilidade e estabilidade;

Com base na tecnologia actualmente disponível, é possível monitorizar os seguintes parâmetros:

- Monitorização de deformações e tensões.
- Monitorização da corrosão em armaduras.
- Monitorização da temperatura.
- Monitorização da abertura de fendas.
- Monitorização das condições meteorológicas.
- Monitorização da vibração de uma estrutura.
- Monitorização de obras geotécnicas.

A necessidade de uma rápida avaliação do desempenho e segurança de estruturas tais como pontes, aeroportos e hospitais, barragens e muitas outras, foi evidenciada devido à ocorrência de vários acidentes recentes, tais como o colapso da Barragem de Teton (figura 1), nos Estados Unidos em 5 de Junho de 1976; ou o caso da Ponte de Entre-os-Rios (figura 2), em Portugal, em 4 de Março de 2001. Mais recentemente, a queda de parte do tecto do terminal 2E do Aeroporto Internacional Charles de Gaulle, em Paris, no dia 23 de Maio de 2004 (figura 3).



Figura 1 - Ruína da Barragem de Teton, Estados Unidos – 1976



Figura 2 – Colapso da Ponte de Entre-Os-Rios, Portugal – 2001 [63]



Figura 3 – Ruína de parte do terminal 2E do Aeroporto Charles de Gaulle, França – 2004 [63]

As cargas excessivas a que algumas estruturas estão sujeito e as circunstâncias ambientais extremas em que muitas se encontram, aceleraram a deterioração destas estruturas. Neste contexto, a necessidade de monitorizar a saúde das estruturas torna-se hoje uma necessidade premente.

Segundo A. E. Aktan et. al. [2], a monitorização da saúde de uma estrutura pode ser definida como *“o registo de medições resultantes de carregamentos normais actuantes sobre a estrutura, e a resposta da estrutura para localizar e avaliar os sintomas devido à ocorrência de incidentes resultantes da utilização, anomalias e/ou deterioração ou danos que possam afectar o uso, desempenho ou a fiabilidade e segurança da estrutura.”*

No caso de estruturas já existentes, é normal estas encontrarem-se submetidas a cargas para as quais não foram dimensionadas. Caso típico é o das pontes rodoviárias, algumas delas centenárias que se encontram submetidas a um tráfego impensável na época em que foram construídas. Nestes casos em que as actuais acções são mais elevadas do que as utilizadas pelo projectista, torna-se necessário equipar a estrutura com sensores que permitem avaliar em tempo real o desempenho da estrutura e assim precaver qualquer tipo de dano que possa contribuir para a sua ruína.

Assim, a monitorização de uma estrutura não é mais do que a implementação de um sistema de detecção de danos e acções. Este processo envolve a observação e inspecção periódica da estrutura, fazendo leituras e recolhendo valores cuja análise permita determinar o estado actual da integridade da estrutura.

Vários estudos recentes publicados [22] indicam que num futuro próximo os custos destinados à reparação e reabilitação de estruturas irão atingir valores consideráveis. A inspecção periódica das nossas estruturas é uma prioridade. No entanto, a maioria das técnicas utilizadas para a observação das estruturas não permite detectar atempadamente factores e sinais de que a estrutura está a deteriorar-se. Muitas das vezes a observação visual apenas detecta o problema quando este já se encontra em elevado estado de actuação.

Devido ao recente desenvolvimento de novos sensores, facilidade e rapidez de transmissão de informação, poderosos sistemas de aquisição de dados equipados com novos software e hardware, podemos pela primeira vez implementar autênticas “estruturas inteligentes” e “sistemas de monitorização de estruturas”.

Para que uma estrutura inteligente tenha interesse para o proprietário, fiscalização e concessionário, esta deverá conter os seguintes três componentes:

- a. Desenvolvimento de sensores de baixo custo que medem os factores mais proeminentes que influenciam a deterioração. Por exemplo, durante anos, a única forma de controlar a presença de cloretos numa estrutura de betão era retirando amostras para posteriormente analisá-las em laboratório. Este processo é muito moroso e apenas permite avaliar o teor em cloretos em pontos singulares da estrutura. Actualmente, recorrendo a sensores de fibra óptica, este parâmetro pode ser registado instantaneamente em várias zonas, a várias profundidades dentro do material [55].
- b. Capacidade para armazenar e transmitir dados em tempo real (ou quase real) a partir de um grande número de sensores dispersos pela estrutura. Estes dados poderão serem transmitidos através de linhas telefónicas ou qualquer outro sistema de transmissão de dados para qualquer lugar. No caso de não haver electricidade no local, poderá recorrer-se a energias alternativas como por exemplo energia solar.
- c. Interpretação dos dados recolhidos pelos sensores. Um dos entraves ao desenvolvimento dos sistemas de monitorização de estruturas foi precisamente a incapacidade de interpretar atempadamente os dados recolhidos através de centenas de sensores distribuídos pela estrutura. É comum recolher “megabytes” de informação semanais. Tipicamente, as

medições de deslocamentos indicam variações diárias e sazonais devido a variações térmicas, ciclos de molhagem/secagem, movimento de fendas, etc. Estas medições em muitos casos acabam por mascarar o que realmente interessa.

Assim, quando bem sucedido, um sistema de monitorização de uma estrutura permite alertar para a ocorrência de problemas e o seu estado de evolução, contribuindo para a segurança e eficiente manutenção da estrutura.

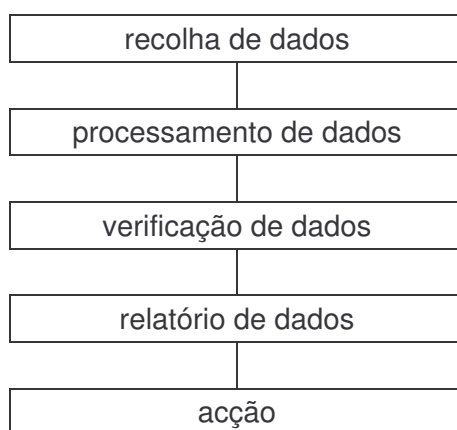


Figura 4 – o processo de monitorização [22]

Por exemplo, com uma completa monitorização duma ponte, é possível que a equipe responsável pela sua manutenção adopte medidas interventivas para reparar ou reabilitar antes que esta atinja um elevado grau de deterioração. Estas tecnologias também deverão ser utilizadas para estabelecer prioridades na necessidade de intervenção e assim permitir uma maior eficácia na gestão de fundos destinados a esta área.

## 1.2 PARÂMETROS MONITORIZÁVEIS

### 1.2.1 MONITORIZAÇÃO DE DEFORMAÇÕES E TENSÕES

Os sensores de deformações e tensões são provavelmente aqueles que mais se encontram desenvolvidos. Extensómetros, LVDT's (*Linear Variable Differential Transformers*), GPS (*Global Positioning System*), fibra óptica, e métodos baseados em feixe de raio laser já são amplamente utilizados em estruturas.

Na medição da deformação de um corpo é vulgar recorrer-se a transdutores resistivos designados por extensómetros (strain gauges) os quais são cuidadosamente colados sobre o corpo sujeito a tensão mecânica, de modo a que a sua deformação,  $\Delta l$ , seja



igual à do corpo,  $\Delta L$ . Trata-se quer de resistências mecânicas quer de semicondutores para os quais a variação relativa da resistência eléctrica é, em determinadas condições, aproximadamente proporcional à deformação provocada nesses elementos.

Quando se aplica uma força mecânica ( $F$ ) a um corpo rígido, a correspondente tensão mecânica ( $\sigma$ ) provoca nesse corpo variação das suas dimensões, isto é, extensões ( $\varepsilon = \Delta L/L$ ). Para deformações elásticas lineares, isto é, quando a existência de deformações só se verifica quando existe força aplicada, é válida a Lei de Hooke (equação 1),

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad \text{Equação 1}$$

em que  $E$  é o módulo de elasticidade do material (ou módulo de Young) definido como a derivada da curva  $\sigma(\varepsilon)$  na zona em que esta tem andamento linear.

A Lei de Hooke relaciona pois as deformações numa direcção com a tensão mecânica aplicada nessa mesma direcção. Isto significa que conhecendo o módulo de elasticidade do material, e com base na leitura da deformação realizadas através de um extensómetro, é possível estimar a tensão instalada no material, na mesma direcção segundo a qual foi medida a deformação.

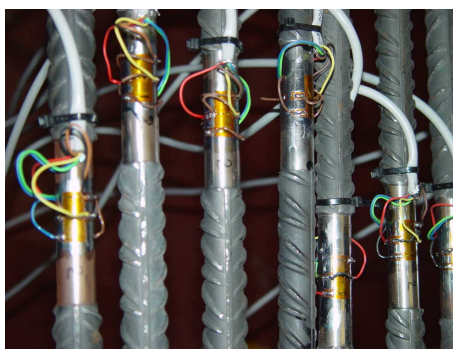


Figura 5 – Extensómetro para medir deformações em armaduras [12]



Figura 6 – Extensómetro para medir deformações no betão [12]



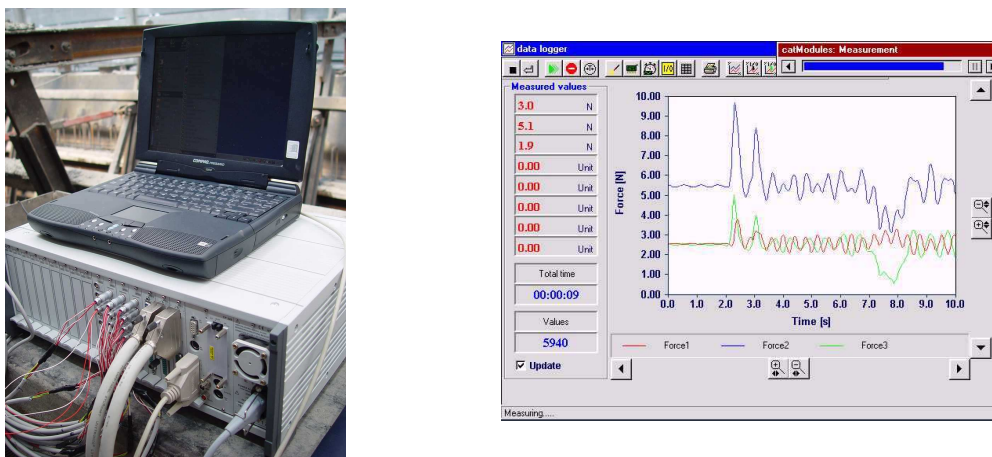


Figura 7 – Sistema de aquisição de dados [12]



Figura 8 – Colocação de sensores numa viga pré fabricada [12]

Acerca de 50 anos, a tecnologia LVDT (figura 9) era relativamente desconhecida excepto para alguns especialistas em instrumentação de controlo de processos. Hoje em dia os LVDT são largamente utilizados como sensores de medição e controlo, sempre que os deslocamentos de poucos milímetros a vários metros se possam medir directamente, ou outras grandezas físicas como força ou pressão possam ser convertidas em deslocamento linear.



Figura 9 – Sensores LVDT's [64]

Mais recentemente, a utilização de sensores de Bragg em Fibra Óptica (SBFO) para monitorizar estruturas de Engenharia Civil (figura 10) tem evidenciado uma grande evolução quer na automatização da aquisição dos dados, quer no desenvolvimento e no aperfeiçoamento dos instrumentos de medida, tornando-os cada vez mais preciosos, resistentes e económicos.



Figura 10 – aplicação de sensores de Bragg em Fibra Óptica [66]

Os sensores Bragg em fibra óptica possuem enormes vantagens sobre outros tipos de sensores convencionais, como por exemplo [13]:

- Uma boa resistência a agressões ambientais;
- Não serem interferidos electromagneticamente, o que evita ruído indesejável;
- Boa estabilidade a longo prazo, o que torna possível a monitorização durante a vida útil das estruturas;
- Baixíssimas perdas do sinal de transmissão, permitindo a monitorização remota a longas distâncias;
- Reduzido peso e dimensões, tornando possível a instalação permanente em estruturas;
- Flexibilidade para adaptarem-se a geometrias difíceis;
- Possibilidade de multiplexar mais de um sensor ao longo de uma fibra;
- Pouca atenuação por unidade de comprimento;
- Elevada sensibilidade;
- Pouco ruído.

A durabilidade dos sensores de fibra óptica num meio altamente alcalino como é o betão, é de capital importância para a monitorização durante todo o período de vida útil da estrutura. A única experiência levada a cabo neste sentido é bastante recente e nela foram estudados distintos sistemas de protecção para a fibra óptica [13].

Outras experiências comprovaram a possibilidade de que os sensores colados a cordões de pré-esforço permitem a medição precisa das deformações produzidas pelas cargas. Este ponto é de extrema importância para a quantificação da resistência à fadiga dos materiais que compõe a estrutura. Também supõe uma possibilidade de medida a ter muito em conta no controlo da resposta sob acções excepcionais (sismos, ventos, cargas excessivas, etc.) [13].

A utilização dos sensores Bragg de fibra óptica parece ter um futuro prometededor no campo das estruturas de Engenharia Civil. No entanto, para que se possa chegar a uma plena utilização, terão de ser resolvidos alguns problemas, como por exemplo [13]:

- Um sensor de fibra óptica embebido ou aderido a uma estrutura deve ser capaz de detectar modificações na mesma, de uma maneira precisa e fiável, ao longo de toda a vida útil da mesma. Os materiais são atacáveis por muitos dos elementos presentes no meio ambiente, desencadeando diversas reacções que podem afectar negativamente os sensores.
- O processo produtivo das estruturas de Engenharia Civil está, ainda, pouco automatizado. Por esse facto, durante o processo de produção dos elementos estruturais, devem tomar-se as medidas adequadas para assegurar que os sensores as fibras que lhe dão suporte estão suficientemente protegidos dos operários, máquinas, agentes ambientais, etc.
- Uma vez concluída a construção, os pontos de entrada e saída das fibras devem ser tratados com todo o cuidado, por serem os pontos mais críticos.

### **1.1.2 MONITORIZAÇÃO DE CORROSÃO DE ARMADURAS**

A corrosão das armaduras é, entre os problemas que afectam a durabilidade de estruturas de betão armado, o de maior importância económica [19].



Figura 11 – Exemplo de armaduras corroídas em estruturas de betão armado

Os dois processos mais importantes que conduzem à corrosão das armaduras são a redução da alcalinidade do betão devido à redução do pH pelo dióxido de carbono (carbonatação) e o ataque por cloretos.

A elevada alcalinidade do hidróxido de cálcio (pH cerca de 13) permite formar uma película fina de óxido de ferro na superfície do aço, designada por camada de passivação. No entanto, em presença de certos agentes como os referidos anteriormente, a película de passivação pode ser destruída activando-se a corrosão.

Para que ocorra corrosão deve existir um electrólito (a água está sempre presente no betão); uma diferença de potencial (pode surgir por diferença de humidade, concentração salina, etc.); oxigénio e agentes agressivos como o cloro. Estes agentes agressivos podem actuar como catalisadores, acelerando o processo de corrosão.

A corrosão da armadura no betão consiste na oxidação destrutiva do aço pelo meio que o envolve. Assim, a corrosão ocorre como resultado da formação de uma célula electroquímica, sendo constituído pelos seguintes elementos principais:

- Um ânodo, onde ocorre a oxidação;
- Um cátodo, onde ocorre a redução;
- Um condutor metálico, por onde a corrente eléctrica passa na forma de fluxo de electrões;

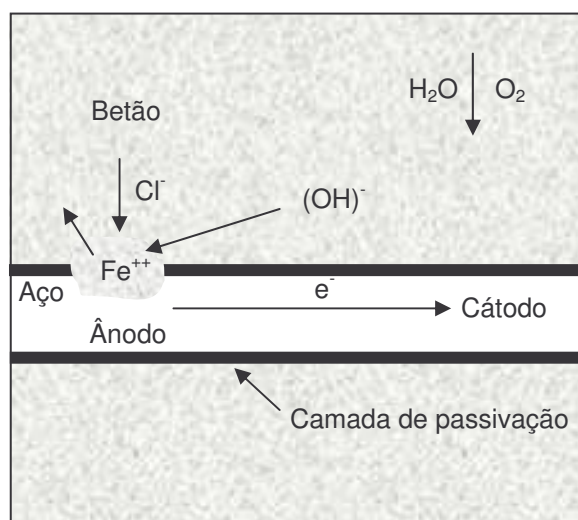


Figura 12 – Esquema da corrosão electroquímica na presença de cloro [19]

Os produtos de corrosão formados possuem um volume muito superior ao do aço. Este aumento de volume pode exceder a resistência à tracção do betão, levando à fissuração/destacamento do betão (figura 13), facilitando o ingresso dos agentes agressivos que aceleram o processo. Por sua vez, a corrosão da armadura resulta numa diminuição da secção, aumentando a tensão actuante e podendo levar ao colapso da estrutura.

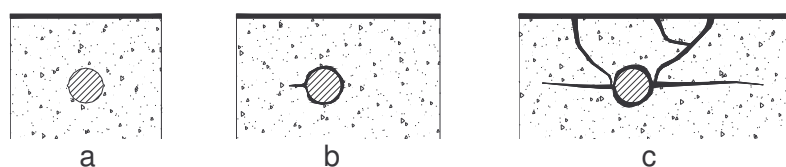


Figura 13 – Fissuração/destacamento do betão devido à corrosão das armaduras

Tradicionalmente, a monitorização do estado de corrosão das estruturas de betão armado é feita através de inspecções visuais. No entanto, têm-se vindo a desenvolver nos últimos anos sistemas de monitorização da corrosão em estruturas de betão armado que permitem a introdução de sensores, especialmente durante a construção ou reparação, que possibilita a avaliação contínua do estado de corrosão das armaduras ou da progressão dos agentes agressivos no betão. A instalação de sistemas de monitorização da corrosão pode portanto ser um excelente meio auxiliar de diagnóstico. Diversos tipos de sensores têm vindo a ser desenvolvidos, sendo que actualmente é possível serem utilizados com um elevado grau de fiabilidade.



A avaliação da corrosão numa estrutura de betão armado pode ser efectuada medindo os parâmetros **electroquímicos do aço** e **físico-químicos do betão** que a seguir se indicam.

### 1.2.2.1 MEDIDAS ELECTROQUÍMICAS DO AÇO

#### ***Potenciais de corrosão***

De uma maneira geral poderá dizer-se que com a diminuição do potencial de corrosão do aço aumenta a probabilidade deste se encontrar despassivado. No entanto, como o valor do potencial de corrosão depende da resistividade do meio, que varia com factores ambientais como por exemplo a humidade e a temperatura, valores absolutos do potencial não devem por si só ser utilizados na avaliação do estado de corrosão das armaduras, recomendando-se em geral, a monitorização contínua deste parâmetro, conjuntamente com medidas de temperatura, humidade e resistividade no interior do betão. [51]

A determinação do potencial de corrosão do aço é feita relativamente a um eléctrodo de referencia colocado próximo da armadura. Note-se que o valor medido corresponde ao potencial do aço na zona mais próxima do eléctrodo de referência.

Como eléctrodos de referência utilizam-se geralmente óxido de manganês, prata/cloreto de prata, chumbo e grafite. Estes últimos eléctrodos são polarizáveis e apresentam a desvantagem do valor do potencial depender do teor de oxigénio e do pH, devendo apenas ser usados em casos limitados, como por exemplo na verificação de sistemas de protecção catódica. Os dois primeiros são eléctrodos não polarizáveis e principalmente o primeiro tem mostrado uma boa estabilidade no tempo em obras que têm sido monitorizadas [57].

#### ***Velocidades de corrosão***

A velocidade de corrosão das armaduras é o parâmetro que melhor permite obter informação acerca da evolução da corrosão [51].

A determinação da velocidade instantânea de corrosão das armaduras tem sido realizada com sensores externos mas pode ser efectuada de uma forma mais fiável utilizando sensores embebidos no betão. Os sensores embebidos são constituídos por três eléctrodos, o eléctrodo de trabalho de aço idêntico ao da armadura, o contra eléctrodo (de aço inoxidável) e um eléctrodo de referência. Conjuntamente com estes

sensores deverão ser instalados sensores de temperatura e resistividade, dado que estes parâmetros influenciam a velocidade de corrosão. Se os sensores de velocidade de corrosão forem colocados junto das armaduras permitirão efectuar medidas das velocidades de corrosão do eléctrodo de trabalho cujo valor deverá ser semelhante ao da velocidade de corrosão das armaduras. Com estes sensores colocados a diferentes distâncias da superfície poderá avaliar-se o avanço das condições de desp passivação do aço e ainda o modo como essas condições influem na velocidade de corrosão, permitindo estimar o comportamento das armaduras que se encontrem com diferentes recobrimentos. [51]

As velocidades de corrosão podem ser determinadas utilizando diferentes técnicas electroquímicas de medida, nomeadamente: técnicas potencioestáticas, de varrimento potenciodinâmico (como a resistência de polarização), de impulso galvanostático ou de impedância electroquímica. Qualquer destas técnicas exige o recurso a equipamento sofisticado e dispendioso, designadamente um potencioestado e um analisador de resposta em frequência, que necessitam de ser operados por técnicos especializados. [51]

Na prática, a determinação da velocidade de corrosão apresenta algumas dificuldades, designadamente pelo facto de não ser ainda possível a aquisição automática das medidas de velocidade de corrosão, o que dificulta a interpretação dos resultados, dado que os valores medidos são instantâneos e vulneráveis a variações periódicas da humidade e da temperatura no interior do betão. Além disso, para betões de elevada resistividade, os equipamentos de medida existentes no mercado apresentam algumas limitações na aplicação das técnicas de medida, porque muitas vezes não permitem compensação da queda Óhmica<sup>1</sup>, o que torna a medida errónea [51].

### ***Correntes galvânicas de macrocélulas***

Um outro método electroquímico que permite obter informação sobre a corrosão das armaduras consiste na medição das correntes galvânicas em macrocélulas [53].

Este sensor é constituído por uma célula formada por dois eléctrodos de materiais diferentes, por exemplo o ânodo de aço idêntico ao das armaduras e o cátodo de aço inox. Se no betão estiverem reunidas as condições para iniciação da corrosão, na macrocélula estabelece-se uma corrente galvânica proporcional à quantidade de ferro

---

<sup>1</sup> Queda Óhmica é a variação de potencial devido ao produto da corrente eléctrica pela resistência da solução contida entre a superfície do eléctrodo de trabalho e a do eléctrodo de referência.

dissolvido no ânodo. A partir da corrente galvânica da célula, sem qualquer aplicação de corrente externa, pode calcular-se a velocidade de corrosão do ferro na macrocélula para as condições existentes no betão, no local de instalação. [53]

A introdução de sensores de macrocélulas, constituídos por ânodos colocados a diferentes distâncias da superfície do betão, permite avaliar a progressão das condições de corrosividade no betão, podendo prever-se a evolução das condições de despassivação das armaduras e ainda obter alguma informação sobre a velocidade de corrosão do aço naquelas condições. Podem também ser utilizadas macrocélulas constituídas por cátodos ligados em diferentes pontos às armaduras. A distância entre o cátodo e a armadura deve ser pequena, de modo a reduzir a influência da resistividade do betão na medição das correntes, e os cátodos devem ser colocados de modo a não causar perturbação do betão junto da armadura. [53]

### ***Corrente de redução de oxigénio***

A aplicação desta técnica requer a utilização de um potenciostato, pelo que apresenta actualmente ainda alguns problemas para a monitorização em contínuo. Contudo, apesar de esta técnica estar ainda em fase de desenvolvimento, tem mostrado resultados muito animadores, revestindo-se de grande interesse em situações em que a reacção catódica é a reacção que controla a velocidade de corrosão, como é o caso de estruturas total ou parcialmente submersas. [51]

## **1.2.2.2 MEDIDAS FÍSICO-QUÍMICAS NO BETÃO**

### ***pH e teor de cloretos***

Os cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) são a causa primária de iniciação/aceleração da corrosão em estruturas de betão armado [19]. As fontes de onde provêm os cloretos são variadas, entre as quais se destacam:

- Adição de  $\text{CaCl}_2$  como acelerador de presa;
- Utilização de água do mar na preparação da mistura;
- Contaminação dos agregados;
- Utilização de sais de degelo;
- Estruturas em contacto com produtos químicos;
- Estruturas em contacto com água do mar;



O método mais corrente para determinar o teor em cloretos no betão consiste na recolha de amostras de betão (figura 14) para posterior análise em laboratório. Geralmente retiram-se amostras de betão em pó para diferentes profundidades, com a finalidade de determinar o perfil de cloretos (figura 15). [26]

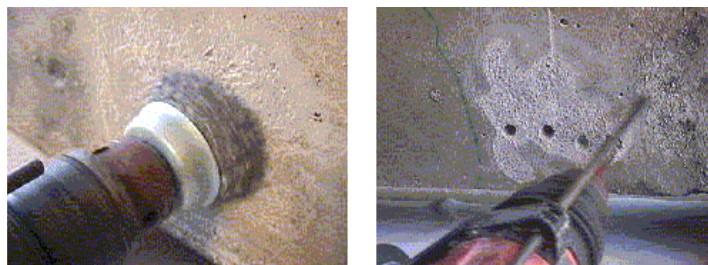


Figura 14 – Extracção de amostras em pó do betão

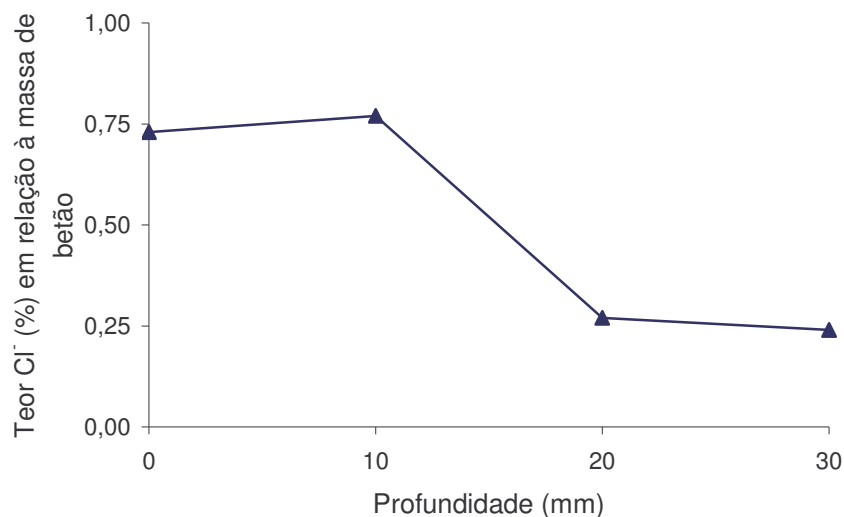


Figura 15 – Exemplo de um perfil de penetração de cloretos no interior do betão [26]

Embora em geral as medidas electroquímicas, nomeadamente as medidas de correntes galvânicas de macrocélulas, permitam indirectamente avaliar a evolução das condições de despassivação do aço devido à carbonatação ou à penetração dos iões cloreto, têm vindo a ser desenvolvidos sensores específicos de medida do pH e do teor em cloretos suficientemente robustos para embeber no betão. Estes devem no entanto ser previamente calibrados em soluções de referência de alcalinidade e de cloretos.

### **Resistividade do betão**

A resistividade do betão depende da microestrutura da pasta de cimento, do teor em água e da contaminação iónica do betão e ainda da porosidade dos agregados e do tipo de interface pasta/agregado. Têm sido encontradas boas correlações da

resistividade do betão com a velocidade de corrosão e com a resistência do betão à penetração dos agentes despassivantes.

### **Temperatura**

A determinação da temperatura no interior do betão é fundamental na interpretação dos valores dos diferentes parâmetros úteis na avaliação do estado de corrosão. As medidas de temperatura com sensores embebidos no betão deverão fazer parte de qualquer sistema de monitorização da corrosão.

### **Humidade**

Embora o tipo de informação obtida através de leituras de humidade no interior do betão seja de grande interesse, uma vez que este parâmetro desempenha um papel importante em todos os processos de degradação existentes no interior do betão, a sua medida directa, expressa em humidade relativa é actualmente ainda difícil.

## **1.2.3 MONITORIZAÇÃO DA TEMPERATURA**

Os transdutores de temperatura ilustram a variedade de compromissos de desempenho que é necessário ter em conta. Intervalo de temperatura, precisão, repetibilidade, dimensão e preço estão todos envolvidos. Os sensores mais utilizados para medir a temperatura são os *termopares* e *termistores*.

### **Termopares**

Uma junção entre dois metais diferentes gera uma pequena tensão, tipicamente da ordem de milivolts, com coeficientes de cerca de  $50\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ . Esta junção é chamada termopar (figura 16), e é útil para medir temperaturas num largo intervalo. Usando vários pares de ligas metálicas é possível cobrir temperaturas desde  $-270^{\circ}\text{C}$  até  $+2500^{\circ}\text{C}$  com uma precisão de  $0.5\text{-}2^{\circ}\text{C}$ .



Figura 16 – Exemplo de termopar

### **Termistores**

Termistores são dispositivos semicondutores que apresentam um coeficiente de resistência com a temperatura negativo, tipicamente da ordem de  $-4\%/^{\circ}\text{C}$ . Termistores destinados a medições precisas têm tipicamente uma resistência de uns poucos milhares de Ohms à temperatura ambiente, e estão disponíveis com uma conformidade apertada ( $0.1-0.2^{\circ}\text{C}$ ). O seu coeficiente de variação de resistência elevado tornam-nos fácil de utilizar, e são baratos e estáveis. Termistores são uma boa escolha para medições de temperatura e controlo no intervalo de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $+300^{\circ}\text{C}$ .

### **1.2.4 MONITORIZAÇÃO DA FISSURAÇÃO DO BETÃO**

A fissuração é um dos principais problemas patológicos que ocorrem em estruturas de betão armado e geralmente o colapso é precedido de fissuração. As fissuras podem também causar diminuição da durabilidade, havendo ainda o constrangimento psicológico que exercem sobre os utentes.

É importante distinguir entre uma fenda activa e uma fenda inactiva. Deste modo, a instrumentação das fendas assume especial significado. Tradicionalmente, a instrumentação de fendas é feita recorrendo ao *“tento” em gesso*, ao *fissurómetro*, (*crack meter* - figuras 17 e 18) e *instrumentação electrónica*.



Figura 17 – Instrumentação de uma fissura com “*crack meter*” [65]



Figura 18 – “*crack meter*” [65]

Actualmente, a detecção e monitorização de fissuras no betão pode ser efectuada com recurso ao ensaio de ultra-sons [44]. O princípio desta técnica baseia-se no facto de a velocidade de propagação do som variar consoante o tipo de meio que este atravessa. Assim, é possível através da medição do tempo que o som leva a percorrer várias distâncias através de uma peça de betão, detectar e medir a profundidade de fissuras.

Outra técnica que tem vindo a ser utilizada na detecção de fissuras é a do impacto-eco [44]. Esta técnica baseia-se na reflexão do som e consiste na aplicação de um impacto na superfície do betão que gera diferentes ondas. Essas ondas propagam-se no betão, sendo reflectidas por fronteiras com materiais de diferentes impedâncias acústicas e posteriormente recebidas por um transdutor que regista a amplitude das ondas que chegam a cada instante. Efectuando a análise desse registo no domínio da frequência, é possível verificar a existência de defeitos no betão (fissuras, vazios ou delaminações) [44].

#### **1.2.5 MONITORIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS**

As condições ambientais (temperatura, humidade, vento, etc.) podem influenciar significativamente as leituras dos sensores. Por isso, o registo das condições ambientais pode ajudar a interpretar os dados obtidos pela monitorização. Poderá ser utilizada uma pequena estação meteorológica, ou utilizar medidas de uma estação meteorológica que se encontre perto da estrutura.

#### **1.2.6 MONITORIZAÇÃO DA VIBRAÇÃO DE UMA ESTRUTURA**

A monitorização de vibrações requer alterações no sistema de aquisição de dados, que deverá ser de alta velocidade. No caso de leituras dinâmicas, há sistemas comerciais de aquisição de dados a alta velocidade disponíveis que vêm tendo um vasto campo de utilização em pontes. O desenvolvimento de acelerómetros de baixo custo irá permitir a utilização generalizada deste tipo de registo para avaliação de danos.

#### **1.2.7 MONITORIZAÇÃO DE OBRAS GEOTÉCNICAS**

No caso de obras geotécnicas, o recurso a instrumentação tem como objectivos os seguintes [37]:

### ***Verificação do projecto***

Os instrumentos são usados para verificar as hipóteses de cálculo e verificar se o desempenho está de acordo com o previsto. Os dados da instrumentação da fase inicial do projecto devem revelar a necessidade (ou a oportunidade) para modificar o projecto em fases posteriores.

### ***Controlo da Construção***

Os instrumentos são usados para monitorizar os efeitos da construção. Os dados da instrumentação podem ajudar o engenheiro a determinar a velocidade a que a construção pode continuar sem o risco de rotura.

### ***Controlo da qualidade***

A instrumentação pode ser usada tanto para forçar a qualidade da mão de obra num projecto como documentar que o trabalho foi realizado de acordo com as especificações.

### ***Segurança***

Os instrumentos podem fornecer com antecedência avisos de roturas que estão para acontecer, dando tempo para a evacuação segura da área e implementar acções correctivas. A monitorização da segurança requer rápida recuperação, processamento, e apresentação dos dados, tal que as decisões possam ser tomadas prontamente.

### ***Protecção legal***

Os dados da instrumentação podem fornecer evidência para uma defesa legal dos projectistas e empreiteiros perante os donos de propriedades adjacentes que protestem em relação a danos causados a suas propriedades.

### ***Desempenho***

Os instrumentos são usados para monitorizar o desempenho de uma estrutura em serviço. Por exemplo, a monitorização de parâmetros como fuga, pressão intersticial, e deformação pode fornecer uma indicação do desempenho de uma barragem. A monitorização de cargas em tirantes de estruturas de suporte ou pregagens e movimentos num talude podem fornecer uma indicação do desempenho do sistema de drenagem instalado num talude estabilizado.

Para monitorizar obras geotécnicas, utilizam-se os seguintes instrumentos:

- Piezômetros para medir a pressão intersticial e os níveis freáticos (figura 19).
- Inclínômetros verticais (figura 20) para monitorizar movimentos laterais de terras em áreas potenciais de deslizamento e aterro. São também utilizados para monitorizar a deformação de muros de suporte e estacas sob carga.
- Inclínômetros horizontais, para aferir perfis de assentamentos de aterros, fundações e outras estruturas.
- Sensores de Viga (figura 21) que monitorizam variações de inclinação de estruturas.
- Extensômetros de furo (figura 22) para monitorizar os assentamentos, os empolamentos, a convergência e as deformações laterais em solos e rochas.
- Extensômetros de fita, que são usados para determinar variações na distância entre pontos de referência ancorados nas paredes ou estruturas de um escavação. As aplicações típicas incluem a monitorização de: convergência entre paredes de túneis e deformações em aberturas subterrâneas.
- Células de assentamento pneumáticas (figura 23), que fornecem a medição do assentamento num único ponto. Podem ser lidas a partir de um local central e são particularmente úteis onde o acesso é difícil.
- Células de carga (figura 24) que são usadas para ensaios de carga e medição de cargas em ancoragens, pregagens e escoras.



Figura 19 – Exemplo de piezômetros [65]



Figura 20 – Instalação de um inclínometro [65]



Figura 21 – Sensor de Viga [65]



Figura 22 – Exemplo de extensômetro de furo [65]

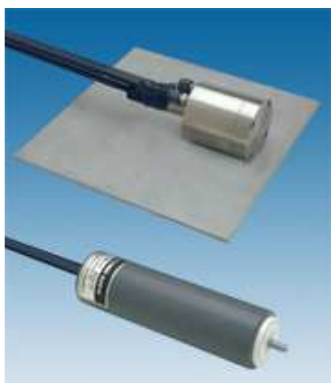


Figura 23 – Células de assentamento pneumáticas [65]



Figura 24 – Células de carga [65]

Tradicionalmente, recorre-se a Marcas Topográficas de Superfície e Marcas de Profundidade.

As Marcas Topográficas de Superfície são instaladas no terreno a cerca de um metro de profundidade, sendo constituídas por um pino em ferro de 20 mm de diâmetro com ponta em latão, e chapa de 150 x 150 mm na base. O pino é envolto num tubo de protecção em PVC de 90 mm de diâmetro, constituem pontos para leitura topográfica de nivelamento de precisão [37].

As Marcas de Profundidade (Bench Marks), são elementos compostos por um tubo galvanizado de um polegada, com uma esfera soldada no topo para servir de apoio à mira, envolto por um tubo de PVC de duas polegadas de diâmetro (tubo de protecção), selados no maciço num local e uma profundidade considerada teoricamente como não sofrendo influência dos trabalhos a decorrer. Servem de pontos de apoio ou referência de nivelamento de precisão (precisão usual de  $\pm 0,1$  mm). [37]

### 1.3 MATERIAIS INTELIGENTES

A utilização de “materiais inteligentes” é outra possibilidade para controlar o desempenho de uma estrutura. São materiais que têm propriedades físicas invulgares que podem ser exploradas com o propósito de monitorização. O interesse destes materiais na perspectiva das estruturas inteligentes é a aptidão para minimizar os custos de exploração da estrutura, maximizando o seu desempenho pelas suas capacidades adaptativas.



Com este objectivo, no Japão foi desenvolvido um betão que inclui entre as suas componentes fibras de vidro ou de carbono que são capazes de medir as variações de tensões no betão, a partir das modificações na resistência eléctrica do compósito. Nos Estados Unidos, foram desenvolvidos sensores inteligentes para verificar o correcto funcionamento de materiais compósitos, utilizando partículas do tamanho de micras que permitem localizar possíveis delaminações do material compósito. [13]

Em *Betões Reforçados Com Fibras de Carbono* [25], José Gonzalez concluiu que: “No que respeita a características eléctricas, o compósito (betão reforçado com fibras de carbono) apresenta propriedades que lhe permitem constituir-se em auto-sensor, ao revelar características de proporcionalidade entre tensões mecânicas e as correntes eléctricas que o atravessam, mantendo essas características para diferentes ciclos de carregamento.”

#### 1.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A decisão mais acertada na selecção dum sistema de monitorização baseia-se na adopção do sistema mais simples que permita obter apenas a informação relevante sobre os parâmetros a monitorizar em cada caso específico. A introdução de sistemas demasiado complexos, para além de complicar e encarecer o sistema de aquisição automática, torna em geral muito difícil a gestão e a interpretação dos dados de monitorização.

Actualmente, com recurso à tecnologia disponível, é possível monitorizar deformações/tensões, corrosão, temperatura, fendas, condições meteorológicas e vibrações. No entanto, normalmente apenas se recorre a estas tecnologias em obras de grande envergadura, complexidade e/ou risco.

Em relação à corrosão, a localização dos sensores deverá incidir nas zonas de maior probabilidade de ocorrência, determinadas por aspectos específicos tais como o ambiente de exposição como seja as zonas de marés e salpicos e as zonas de menor exposição às chuvas, de condensação ou de estagnação, e aspectos específicos do projecto estrutural ou das práticas construtivas que nomeadamente, originam juntas de betonagem e de dilatação, zonas de elevada densidade de armaduras e zonas de canto.



O uso de “materiais inteligentes” na Engenharia Civil ainda está longe de ser generalizado. Assim, durante algum tempo, os materiais tradicionais continuarão a ser os mais usados na construção de novas estruturas (ainda que provavelmente na reparação das já existentes a tendência possa já ser a contrária).

---

## **BETÕES REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO**

*capítulo dois*

## 2.1 GENERALIDADES

Entende-se por betão reforçado com fibras qualquer material compósito de matriz cimentícia ao qual se adicionaram na sua composição fibras.

A partir da II Guerra Mundial vários tipos de fibras têm sido utilizados como reforço, nomeadamente fibras de asbestos (compósito fibrocimento), fibras de vidro, fibras de polímeros, fibras de aço, fibras de carbono e mais recentemente, fibras de banana, bambu, capim elefante, juta, malva, folha de ananás, sisal, entre outras. [25]

De um modo geral, estes compósitos revelam melhorias nos seguintes aspectos [25]:

- Na inibição da fracturação e aumento da tenacidade;
- No aumento da resistência à compressão e à tracção, e por consequência no desempenho à flexão;
- Na conservação da capacidade de carga, mesmo para estados avançados de fendilhação, (PSH – Pseudo Strain Hardening);
- No aumento na impermeabilidade do material e da resistência ao ataque dos agentes nocivos;
- No aumento na resistência contra a degradação causada por uma excessiva concentração de solicitações mecânicas e térmicas.
- No aumento na durabilidade, como consequência das propriedades acima expostas;

O exemplo mais conhecido deste tipo de compósito é o fibrocimento. Consiste numa matriz de pasta de cimento reforçada com fibras de amianto, isto é, dois materiais de características frágeis trabalhando em conjunto. Devido às condições de produção, onde o excesso de água é removido da massa por prensagem e filtragem, é possível uma elevada dosagem do teor de fibra [20]. O objectivo do elevado teor em fibra é o aumento da capacidade resistente do material graças ao elevado módulo de elasticidade da fibra (160 -200 GPa) e da elevada aderência com a matriz cimentícia. Com esta tecnologia foi possível produzir componentes esbeltos, leves e de baixo custo. [20]

Fibras sintéticas como polipropileno e nylon têm surgido como alternativas às fibras de amianto no reforço de matrizes de base cimentícia. Tal opção deve-se mais aos

problemas de saúde ligados ao manuseamento do amianto do que pelo desempenho, uma vez que este proporciona um maior ganho de desempenho. [20]

O betão é por si só, um material com inúmeras vantagens. Permite produzir estruturas com infinitas variações de forma, assim como é capaz de apresentar uma grande variação das suas propriedades em função do tipo de componentes e das suas proporções, bem como da utilização de uma grande variedade de adições e aditivos. No entanto, este material apresenta algumas limitações como o comportamento de ruptura frágil e pequena capacidade de deformação, quando comparado com outros materiais estruturais como por exemplo o aço. Além disso, o betão apresenta uma resistência à tracção muito baixa, cerca de um décimo da resistência à compressão. Tal deve-se às fissuras que se formam ou já estão presentes no betão, que prejudicam muito o material quando é solicitado à tracção.

De uma forma simplificada, podemos dizer que a presença de fibras dificultam a propagação das fendas e permite uma redistribuição de esforços no material, mesmo quando utilizadas em baixa quantidade. O betão, por tratar-se de um material frágil apresenta-se susceptível às concentrações de tensões originadas pelo aparecimento de uma fissura.

No caso de betão simples, o surgimento de uma fissura irá representar uma barreira à propagação das tensões, representada simplificada pelas linhas de tensão. Este “desvio” irá provocar uma concentração de tensões na extremidade da fissura e, no caso desta tensão superar a resistência da matriz, teremos a ruptura abrupta do material. Caso se trate de um esforço cíclico, a ruptura dá-se por fadiga segundo o mesmo princípio. Em cada ciclo há uma pequena propagação das microfissuras e, consequentemente, um aumento progressivo na concentração de tensões nas suas extremidades até ao momento da ruptura do material. Assim, a partir do momento em que se abre uma fissura no betão este rompe abruptamente, caracterizando um comportamento tipicamente frágil. Ou seja, não podemos esperar nenhuma capacidade resistente num betão fissurado.[20]

Quando se adicionam fibras ao betão, este deixa de ser um material marcadamente frágil. Tal ocorre pelo facto de cada fibra servir como ponte de transferência de tensões através das fissuras (figura 25), minimizando a concentração de tensões nas extremidades das mesmas. Assim, obtém-se uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no betão, que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil,

ou seja, apresenta uma certa capacidade portante pós-fissuração (PSH - Pseudo Strain Hardening).

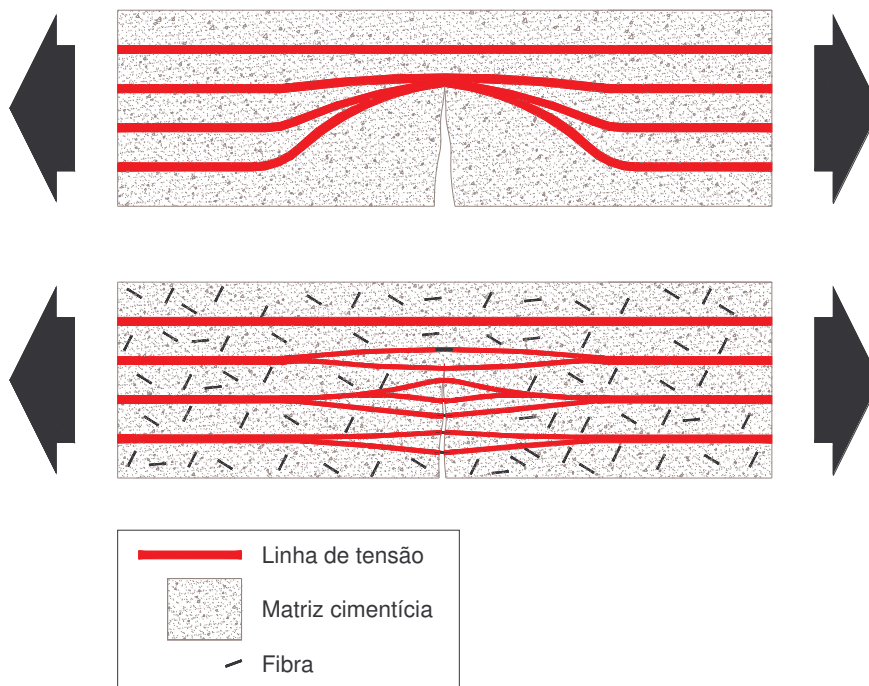


Figura 25 – Comparação entre as linhas de tensão em betão fissurado sem fibra e com fibra

O desenvolvimento e aplicação de novos materiais nas últimas décadas têm proporcionado avanços significativos em diversos sectores da sociedade moderna. Estes avanços têm proporcionado, de maneira geral, uma melhor qualidade de vida para o homem em diversos sectores, como por exemplo nos de telecomunicações, transporte, medicina e construção civil, entre outros.

Entre diversos materiais estudados actualmente, as fibras de carbono têm merecido uma atenção especial de diversos grupos de pesquisas devido às suas características peculiares, das quais se destaca a baixa densidade associada a uma elevada resistência mecânica. Estes materiais foram utilizados pela primeira vez nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, e o sucesso desta aplicação fez crescer as pesquisas e as novas aplicações envolvendo este material, bem como o aperfeiçoamento do processo de fabricação [16].

Actualmente, as fibras de carbono são empregues nos mais diversos sectores da actividade humana, tais como nas indústrias automobilística, de materiais desportivos e medicinais e na engenharia civil.

## 2.2 PRODUÇÃO DAS FIBRAS DE CARBONO

Os primeiros registros da produção de fibras de carbono são atribuídos a Thomas Edison [52], que empregou este material como filamento em lâmpadas eléctricas incandescentes. Embora esta primeira preparação de fibras de carbono tenha ocorrido em 1878, este material só começou a ser produzido comercialmente a partir de 1964<sup>2</sup>. O interesse pela produção deste material foi proporcionado pelos avanços ocorridos nas indústrias aeronáuticas e bélicas durante a década de 60. Nesta época, a produção comercial deste material seguiu um caminho semelhante ao utilizado por Thomas Edison, onde foi empregue neste caso fibras de rayon [52]. Actualmente, os principais materiais precursores utilizados na produção de fibras de carbono são o rayon, a poliacrilonitrila (PAN) e o pitch de petróleo.

O processo de fabricação pode variar segundo o precursor utilizado. No entanto, de maneira geral, o método envolve uma primeira etapa onde as fibras do material precursor são oxidadas a temperaturas próximas de 200°C de maneira lenta e controlada, para evitar uma excessiva volatilização ou fusão do precursor. Posteriormente, a temperatura é elevada a valores próximos de 1600°C para a carbonização do material em atmosfera inerte. Em alguns casos, o material pode ser ainda aquecido a temperaturas acima de 2000°C, sendo que nesta última condição, o material resultante possui características semelhantes àsquelas encontradas no grafite [16,18].

Genericamente, a produção das fibras de carbono a partir de um dos precursores sólidos pode envolver várias fases, que incluem as seguintes:

- **Preparação:** Inicialmente, é feita a preparação do PAN ou do rayon, ou é efectuada a modificação prévia da composição química do pitch.
- **Fiação:** O precursor é transformado em fibra com diâmetro de 100µm à saída da fieira, diminuindo até 10µm depois de ser esticada durante a bobinagem, e com as moléculas alinhadas paralelas à direcção da fibra.
- **Estabilização:** As fibras são sujeitas a um processo de oxidação parcial com o propósito de as endurecer. Desta feita, a temperatura de fusão é aumentada para um valor superior à temperatura de decomposição, e a orientação das moléculas do precursor fica fixa.

- **Carbonização:** O precursor é convertido em carbono, com estrutura baseada naquela da grafite por aquecimento numa atmosfera inerte a temperaturas na gama dos 1600°C a 1800°C.
- **Grafitização:** A fibra é aquecida a temperaturas muito elevadas, até 2500°C, para aumentar o grau da estrutura grafítica.
- **Oxidação superficial:** As fibras são sujeitas a tratamento oxidativo para aumentar a rugosidade e polaridade superficial.

Em alguns processos de fabricação, o material precursor é inicialmente esticado, sendo posteriormente oxidado e carbonizado com a finalidade de evitar a relaxação da cadeia polimérica [18]. Quando este processo é realizado a temperaturas superiores a 2200°C, as fibras de carbono obtidas apresentam um maior ordenamento da cadeia polimérica [52].

Além dos diferentes processos de fabricação, existe também a preparação de fibras reforçadas, as quais são cobertas com diferentes materiais poliméricos, cerâmicos, carbonetos e activadas por gaseificação em vapor de nitrogénio [36-50].

O mecanismo de pirólise (*decomposição química que ocorre devido a temperatura elevada, na ausência de oxigénio*) para a produção das fibras de carbono tem sido alvo de muitos estudos. Tang e Bacon [56] propuseram um mecanismo para a pirólise do rayon baseados nos dados obtidos por meio de espectroscopia na região do infravermelho e análises termogravimétricas (*técnica térmica onde a massa da amostra é registada em função da temperatura ou do tempo*), associados às propriedades físicas dos materiais intermediários obtidos nas diferentes etapas do processo de fabricação.

Donnet e colaboradores [16] descreveram os mecanismos propostos por Fitzer e colaboradores e por Watt e Huron para a produção de fibras de carbono preparadas a partir da PAN. O processo envolve várias etapas de reacção e, segundo Fitzer, existem duas etapas principais, a pré-oxidação entre 200 e 300°C e a eliminação de heteroátomos (*átomos de outro elemento que não carbono*) e formação das cadeias de grafite entre 300 e 1000°C. Watt e Huron, num estudo mais detalhado da pirólise da PAN, mostraram que existem outras etapas de reacção dentro das duas etapas principais propostas por Fritzer.



Edmonds [18] também fez uma breve exposição sobre as diferentes etapas de reacção que ocorrem durante a pirólise da PAN na preparação das fibras de carbono. Neste trabalho, além das transformações que este material sofre entre a temperatura de oxidação (próximo de 200°C) e carbonização (próximo de 1600°C) são também discutidas as mudanças ocorridas até a temperatura de grafitação (próximo de 2700°C).

## **2.3 ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DAS FIBRAS DE CARBONO**

Desde os primeiros trabalhos envolvendo a preparação de fibras de carbono, várias pesquisas têm procurado elucidar a estrutura, propriedades e características destes materiais. Actualmente, vários estudos são ainda realizados utilizando diferentes técnicas instrumentais, das quais podem ser destacadas a difracção de raios-X [3, 30] a microscopia electrónica e óptica [41, 23], a espectroscopia fotoeletrónica de raios-X e o Raman [23,33].

De maneira geral, os resultados encontrados revelam que as principais propriedades das fibras de carbono como a resistência mecânica, estrutura e composição, dependem do tipo de material de origem e do processo de fabricação. Alguns trabalhos descrevem o mecanismo de polimerização [3] e mudanças estruturais que ocorrem nas fibras durante a etapa de carbonização [33].

Sob o ponto de vista estrutural das fibras de carbono, Donnet [16] discute dois modelos que foram propostos, simultânea e independentemente, em 1969 por Johnson e Tyson e por Fourdeux e colaboradores.

O modelo de Johnson e Tyson sugere que as fibras são formadas pelo empilhamento de várias fitas de carbono como mostrado na figura 27. Neste caso, o empilhamento está relacionado com o comprimento axial da fibra de carbono, enquanto que as várias colunas colocadas lado a lado determinam a espessura da fibra ou sua secção transversal.

O modelo proposto por Ruland [16] é completamente diferente do discutido anteriormente, sendo o mais aceito actualmente para descrever a estrutura das fibras de carbono [16, 18].

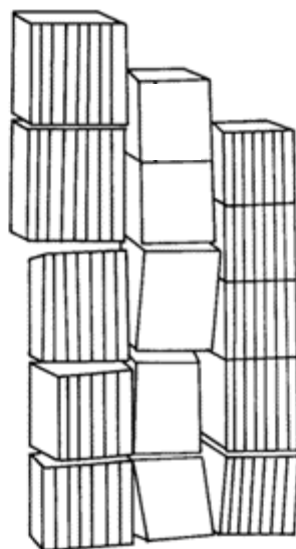


Figura 26 – modelo de estrutura de fibra de carbono proposto por Johnson e Tyson

Neste modelo, mostrado esquematicamente na figura 27, as fibras são formadas por diversos conjuntos de tiras, sendo que estas possuem aproximadamente 6 nm (*nanómetros*) de espessura e alguns milhares de nm de comprimento. Várias dessas tiras são ordenadas paralelamente formando vários conjuntos de tiras denominados de microfibras, as quais se estendem em direcção ao eixo axial da fibra de carbono. As superfícies axiais destas microfibras são formadas por diversos planos basais de grafite [16,18].

No esquema mostrado na figura 27, podem ser observadas também lacunas entre as microfibras com dimensões de 20 a 30 nm de comprimento e 1 a 2 nm de largura. Estas falhas aparecem durante a formação da fibra de carbono, devido às dobras das microfibras e imperfeições de acondicionamento. Outros trabalhos têm demonstrado que diferentes tipos de lacunas podem ainda aparecer devido à volatilização de materiais presentes nas fibras durante o aquecimento [18]. Neste caso, estas falhas estruturais possuem dimensões diferentes que aquelas descritas anteriormente, podendo alcançar comprimentos da ordem de 5 a 10  $\mu\text{m}$ . O resultado deste modelo estrutural revela que as fibras de carbono possuem uma baixa porosidade ao longo do eixo axial, enquanto que ao longo da secção transversal a porosidade é bastante elevada. Alguns modelos estruturais da secção transversal de fibras de carbono são apresentados na figura 28. Existem diversas estruturas, sendo as mais comuns as do tipo radial, aleatório e círculos concêntricos [52].

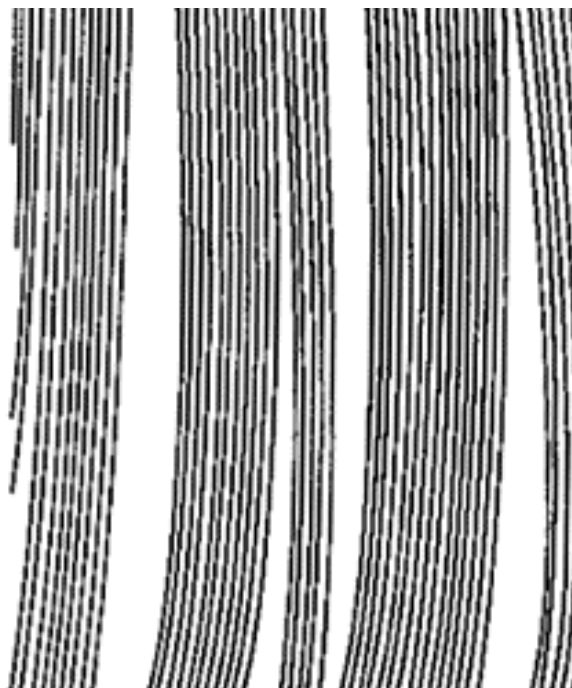


Figura 27 – Modelo da estrutura de fibras de carbono proposto por Ruland



Figura 28 – Modelos de estruturas transversais de fibras de material tipo PAN e pitch [52]

As fibras de carbono obtidas a temperaturas elevadas, empregando materiais precursores como PAN ou pitch, possuem estruturas muito semelhantes às encontradas no carbono vítreo, com arranjos superficiais similares aos de microfibras entrelaçadas [15].

A composição das fibras de carbono depende do tipo material e da temperatura utilizada no processo de fabricação. Basicamente, quando as fibras são preparadas em temperaturas próximas de 1000°C, elementos como C, H, N e O são normalmente encontrados. À medida que a temperatura aumenta, as percentagens de H, N e O diminuem, enquanto que a de carbono aumenta [33]. Para valores de temperatura próximos de 2000°C, a fibra é composta essencialmente por átomos de carbono [52].

## 2.4 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE CARBONO

Trabalhos recentes classificam as fibras de carbono segundo o grau de orientação preferencial das camadas de *grafeno*<sup>2</sup> na direcção axial das fibras.

Baseado neste aspecto, as fibras são denominadas de alto módulo (AM), médio módulo (MM) e baixo módulo (BM), sendo classificadas como tipo I, tipo II e tipo III, respectivamente [14]. Na tabela 1 estão reunidas algumas das principais características e propriedades destes três tipos de fibras de carbono.

Tabela 1 – Tipos de Fibras de Carbono [14]

Fibra	Resistência à Tracção (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Observações
Tipo I	2,6	340 (alto)	Alta densidade, baixa porosidade, microfibras lineares e bem ordenadas
Tipo II	2,9	240 (médio)	Alta qualidade de microporos de 0,1 a 5 µm
Tipo III	2,6	160 (baixo)	Alta qualidade de microporos, extensa área superficial, microfibras distorcidas e pouco ordenadas

As fibras de alto módulo têm um elevado grau de alinhamento carbono-carbono, ligados paralelamente na direcção axial da fibra, resultando em uma estrutura denominada de "árvore de anéis". Esse tipo de fibra é preparada por meio de materiais precursores como o pitch de mesofase e PAN. Já as fibras de baixo módulo são obtidas a partir de materiais como o rayon e o pitch isotrópico. O primeiro tipo de fibra apresenta um custo mais elevado, pois o processo de fabricação é mais complexo, necessitando de uma etapa de estiramento do material precursor e de altas temperaturas [52, 14].

Quando fibras de carbono são submetidas a tratamento térmico, observa-se uma diminuição da resistência eléctrica com o aumento da temperatura. Este facto está associado ao maior grau de perfeição das cadeias de carbono, que são obtidas durante o processo de aquecimento deste material [8]. Além disso, foi observado também que existe uma correlação entre os valores de resistência eléctrica e os diferentes grupos funcionais presentes na superfície das fibras. Em relação a estes

<sup>2</sup> Grafeno são camadas hexagonais reticulares presentes na grafite natural. Quando os planos de camadas hexagonais estão empilhados com ordem tridimensional o material é definido como grafite.

grupos funcionais, observa-se que eles são basicamente compostos por oxigénio, predominando grupos carboxílicos, hidroxílicos e etílicos. Existe ainda a possibilidade de se encontrar grupos aromáticos como quinonas, hidroxiquinonas e fenóis. O tipo de grupo, bem como a sua densidade na superfície da fibra, depende do tratamento térmico e do tipo de oxidação química e/ou electroquímica ao qual o material é submetido antes da sua utilização [18].

A figura 29 resume as principais características, propriedades e usos dos três principais tipos de fibras, obtidos a partir de diferentes materiais precursores.

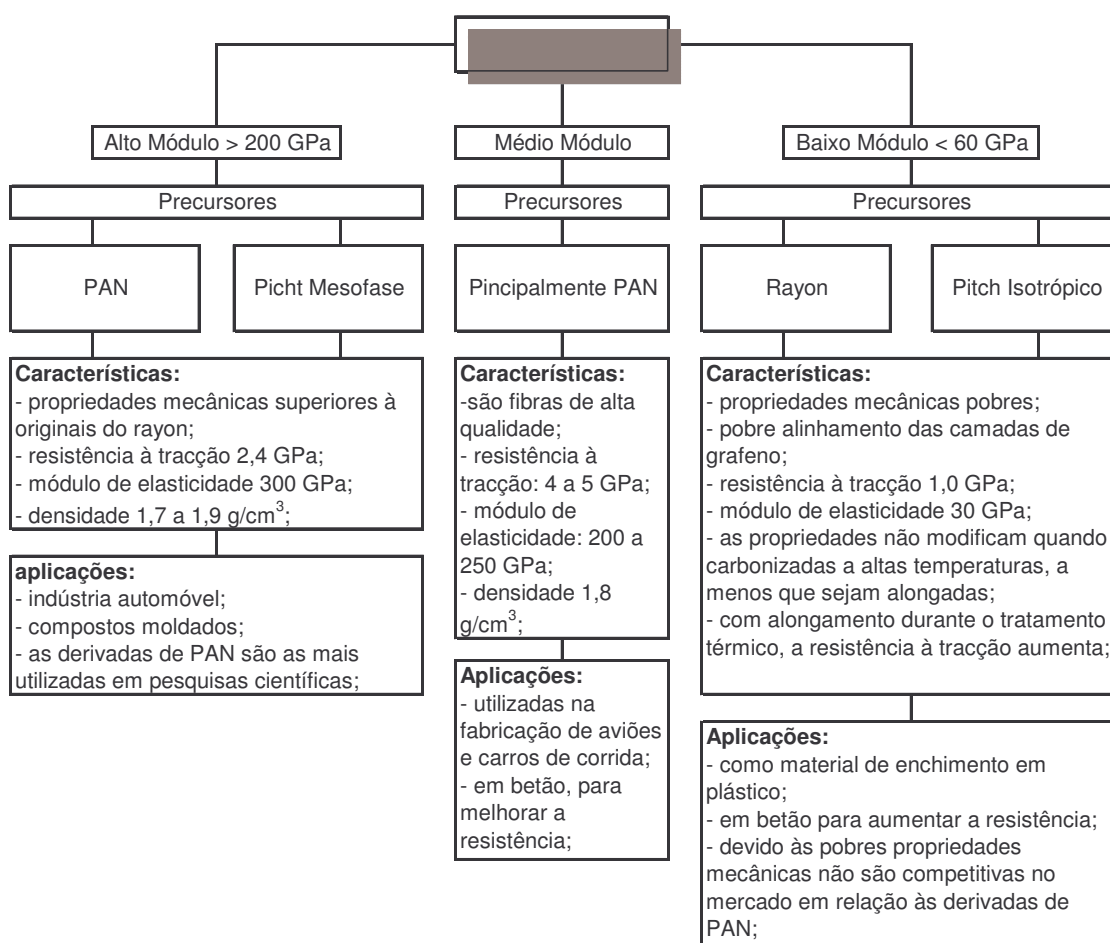


Figura 29 – Organograma que reúne as principais propriedades, características e aplicações das fibras de carbono [14]

## 2.5 BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO (CFRC)

As fibras pitch são aquelas que apresentam melhor aplicabilidade para compósitos de matriz cimentícia, apesar de apresentarem valores inferiores em termos de resistência e módulo de elasticidade. Esta característica deriva da sua versatilidade de utilização nos vários processos construtivos, isto é, cofragens preenchidas com material mais fluido ou prensagens, gunitagens, extrusão e centrifugação de material menos fluido. As fibras PAN de alto desempenho são excessivamente caras para serem utilizadas na construção civil. [25]

Sendo um material relativamente novo, as fibras de carbono têm propriedades que as tornam um material de eleição para aplicações de compósitos na construção civil. As propriedades relevantes das fibras de carbono incluem as seguintes [25]:

- Razão de resistência/densidade elevada;
- Evitam a polémica sobre os efeitos cancerígenos das fibras de asbestos;
- Ao contrário das fibras de aço, as fibras de carbono não oxidam em ambientes de baixa alcalinidade;
- As fibras de carbono não se deterioram em ambientes de alcalinidade elevada como acontece com as fibras de vidro;
- As fibras de carbono apresentam uma grande indiferença às agressões químicas, o que as torna no reforço adequado para as estruturas em ambientes agressivos nos complexos químico-industriais, obras marítimas e estações de tratamento de afluentes;
- As fibras de carbono conferem propriedades eléctricas ao betão, tornando-o apto para funcionar como escudo a campos magnéticos;
- A variação das condições de resistividade eléctrica quando a matriz fendilha, propicia a utilização de CFRC como auto sensor, para a monitorização do seu estado de serviço e integridade.

O preço da fibra a incorporar não é ainda de feição à sua aplicação generalizada, mas a sua utilização é função da eficácia da fibra de carbono, que permite mesmo para dosagens baixas em termos de volumes de fibra incorporada ganhos apreciáveis de desempenho, (da ordem dos 0.2% em volume relativamente a 1.5% do aço para nível de desempenho similar) [60], conjuntamente com a tendência da redução dos preços deste, fazem prever uma utilização cada vez maior do CFRC.

### 2.5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CFRC

No estado fresco a propriedade mais importante do betão é a sua trabalhabilidade. Como é de esperar, a adição de fibras reduz a trabalhabilidade, a qual é melhorada pela acção conjunta da água e adições de plastificantes e superplastificantes [25].

Foi constatado que a adição de fibras reduz a trabalhabilidade, medida em abaixamento do cone de Abrams, de 152 mm para 102 mm (a/c 0.5); de 127 para 50.8 (a/c 0.45); e de 102 para 45.7 (a/c 0.40), ou seja, menor a razão a/c, maior redução de trabalhabilidade. A utilização conjunta de fibras e sílica de fumo e ainda com plastificante manteve a redução para a/c, mas reduziu ainda mais, de 127 para 25.4 o slump relativo a a/c 0.45. este estudo revela que a razão a/c escolhida deve ser 0.5 para CFRC. [60]

Esta perda de trabalhabilidade traz como consequência uma maior dificuldade na colocação do betão mas tem associado em si dois aspectos positivos: a exsudação, ou seja, a migração da água para a superfície do betão, é reduzido e a capacidade de auto suporte é maior, donde as resistências em idades jovens aumentam, permitindo uma descofragem mais cedo. [25]

A incorporação de fibras traz como consequências uma menor capacidade de resistência à compressão [Balaguru,88]. O fenómeno, aparentemente contraditório, deve-se ao aumento de porosidade devido à existência de bolhas de ar que acompanha a incorporação da fibra. Para pequenas quantidades de fibra, a redução da resistência à compressão é ligeira, aumentando significativamente com o aumento do teor em fibra. Pu Woei [60] verificou uma diminuição de 29.2 MPa para 24.71 MPa aos 28 dias em provetes de betão simples e betão com fibra, respectivamente.

A principal vantagem do funcionamento das fibras dispersas em modo aleatório no seio da matriz é o aumento da resistência à flexão, derivado do facto de que a zona traccionada e fissurada, continuar até certo limite, a conservar a sua capacidade de carga, mercê da existência da fibra, que une as duas superfícies de fractura, transmitindo através dela uma tensão de tracção que de outra forma não poderia existir, tal como já foi exemplificado (figura25). [60]

A retracção é uma prioridade intrínseca do betão, função da quantidade de água em fase líquida no seu interior. A presença de fibra no seio da matriz contribui para uma maior estabilidade adimensional, resultando numa diminuição de retracção quando



são adicionadas ao betão. Esta propriedade do compósito torna-o adequado para a utilização em interfaces entre material já antigo, e portanto que já sofreu uma parte apreciável de retracção, e material fresco, contrariando deste modo a tendência de deslocamentos entre os dois, o que é bastante comum. [25]

Tabela 2 – o desempenho dos compósitos de diferentes fibras, expresso em forma de resistência à flexão e tenacidade [60]

Fibra	Teor de fibra, % vol	Ganho de resistência à flexão	Ganho de tenacidade
Aço	0.6-2.0	10-80%	400-900%
Polímero	2.0-6.5	35-160%	400-1100%
Vidro	0.5-2.5	50-200%	50-200%
Carbono	1.0-2.0	10-150%	140-1300%

## 2.5.2 CFRC APLICADO A ESTRUTURAS INTELIGENTES

O compósito formado betão utilizando fibras de carbono, CFRC, apresenta a característica de modificar as suas condições de resistividade conforme o estado de fracturação da matriz, numa escala que pode ser mensurável e permitir uma correlação entre esta variação da resistividade e o estado de tensão/extensão do material. Este facto permite-lhe conferir capacidades de auto-avaliação do estado de serviço de forma simples e económica, sendo possível detectar patologias da construção e tomar medidas correctivas, invertendo tendências que a médio prazo conduziriam a um colapso ou prematuro estado de incapacidade. [25]

As fibras de carbono são condutoras de electricidade, o que permite estabelecer uma nova concepção para este compósito que é a de se constituir um sensor do seu próprio estado de fissuração, através da variação da resistividade quando a corrente eléctrica percorre um troço pré determinado. O mecanismo associado a esta propriedade baseia-se no facto de que estados de tensão provocam estados de fissuração, associados a deslocamentos relativos das superfícies de factura, o que por sua vez vem provocar alterações nas condições de passagem de corrente. Dependendo do estado de fissuração, o movimento relativo das duas superfícies de fractura permite o encosto/separação das extremidades das fibras, fazendo com que a alteração das propriedades da corrente eléctrica reflectam as condições de tensão/deformação. [25]

A fracturação que se desenvolve no interior da matriz provoca a interrupção da fase líquida, e consequentemente, da corrente que a utiliza como via. Porém a existência de fibra permite, dentro de certos limites, assegurar a continuação da passagem da corrente, mesmo quando se verifica a fracturação.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A adição de fibras ao betão confere-lhe uma série de propriedades que permitem melhorar o seu comportamento, nomeadamente no que respeita ao aumento de ductilidade, resistência à flexão, capacidade portante pós-fissuração e diminuição da retracção.

As fibras mais utilizadas são as fibras de aço e as fibras de amianto. Estas últimas foram amplamente utilizadas na fabricação do fibrocimento, sendo actualmente substituídas por fibras sintéticas devido a problemas de saúde relacionados com o manuseamento do amianto.

Sendo um material relativamente novo, as fibras de carbono apresentam propriedades que as tornam num material promissor para aplicação na engenharia civil. Estas podem ser obtidas através de três diferentes materiais precursores, PAN, pitch e Rayon, sendo as pitch aquelas que apresentam melhor aplicabilidade na engenharia civil.

No entanto, a propriedades mais interessante das fibras de carbono consiste na possibilidade de conferir ao betão reforçado com fibras de carbono – CFRC comportamento inteligente. Isto é, o CFRC apresenta a característica de, com base na leitura da variação da sua resistividade eléctrica, permitir uma correlação entre esta variação e o seu estado de tensão/extensão, conferindo ao material capacidade de “auto-sensor”, de forma simples e económica.

---

## **A RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DO BETÃO**

*capítulo três*

### 3.1 GENERALIDADES

A resistividade eléctrica é um dos parâmetros que pode permitir aferir a qualidade e durabilidade de um betão [19]. Este factor físico-químico do betão é muitas vezes utilizado na monitorização da corrosão nas armaduras do betão armado. Este parâmetro está relacionado com a permeabilidade aos fluidos e a difusibilidade de iões através dos poros do betão. Por isso, muitas vezes é esta medida que controla a velocidade com que a corrosão ocorre, pois controla o fluxo de electrões que se difundem no interior da matriz. [40]

A resistividade é a razão entre a diferença de potencial aplicada ao provete e a intensidade da corrente eléctrica que o atravessa. Tem como dimensão a resistência multiplicada pelo comprimento, representa-se geralmente por  $\Omega \cdot m$  (Ohm metro). A condutividade é o inverso da resistividade.

O *Comité Euro-International du Béton* (CEB 192, 1989) apresenta critérios de avaliação da probabilidade de corrosão em função da resistividade do betão. Os resultados apresentados constam na tabela 3.

Tabela 3 – Critérios de probabilidade de corrosão em função da resistividade do betão

<b>RESISTIVIDADE DO BETÃO</b>	<b>PROBABILIDADE DE CORROSÃO</b>
< 5 k $\Omega$ .cm	Muito alta
5 a 10 k $\Omega$ .cm	Alta
10 a 20 k $\Omega$ .cm	Baixa
>20 k $\Omega$ .cm	Desprezível

O grau de hidratação da pasta de cimento é o principal responsável pelas propriedades condutoras do betão. A condutividade da pasta de cimento hidratada é muito superior à dos agregados, por isso a condutividade é controlada pela fracção da pasta de cimento presente na matriz, e esta condutividade diminui durante a hidratação do cimento. Tal deve-se à redução do volume de água nos poros da matriz e as alterações ocorridas na microestrutura do betão. De facto, é principalmente a presença de água na matriz que influencia a resistividade/condutividade da pasta de cimento. Como parte desta água é consumida durante o processo de hidratação do cimento, é natural que a resistividade aumente com o tempo. [7]

A resistividade eléctrica do betão aumenta com a carbonatação (em particular em betões onde é utilizado cimento Portland) devido à redução de iões disponíveis para conduzir a electricidade, além de aumentar a densidade do betão. [58]

A leitura deste parâmetro requer muita atenção devido ao seu elevado grau de sensibilidade. A resistividade eléctrica superficial é a grandeza que indicará a maior ou menor probabilidade do início da corrosão das armaduras e poderá ter as seguintes finalidades:

- Determinar a gama de valores de resistividade de uma determinada estrutura em particular e avaliar o risco de corrosão;
- Localizar as partes mais permeáveis de uma estrutura para definir pontos fracos e tomar medidas protectoras;
- Localizar zonas com maior exposição à água e agentes agressivos dissolvidos;
- Auxiliar na concepção de sistemas de protecção catódica e outros tratamentos electroquímicos;
- Controle da qualidade do betão na fase de produção;

Geralmente, utilizando corrente alternada (ac), as propriedades eléctricas dos materiais variam com a frequência. No entanto, segundo McNeill [39] o facto da resistividade do betão enquadrar-se geralmente entre 0.1 e 100 k $\Omega$ .cm, faz com que esta propriedade seja relativamente independente da frequência. As leituras efectuadas em betões utilizando correntes alternadas com frequência inferior a 1000 Hz foram equivalentes às realizadas utilizando corrente contínua (dc). [27]

### 3.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DO BETÃO

Existem basicamente duas teorias para explicar a resistividade eléctrica do betão e como é transportada a corrente dentro da massa do betão: formulações puramente teóricas e formulações baseadas em dados laboratoriais [58].

A primeira baseia-se na teoria dos materiais compósitos. Portanto, é independente da natureza física do betão. Esta teoria pretende prever a resistividade do material como um parâmetro função da resistividade de cada um dos diferentes componentes do betão, suas dosagens e proporções, e até em formulações mais elaboradas, a forma e tamanho dos constituintes. [58]

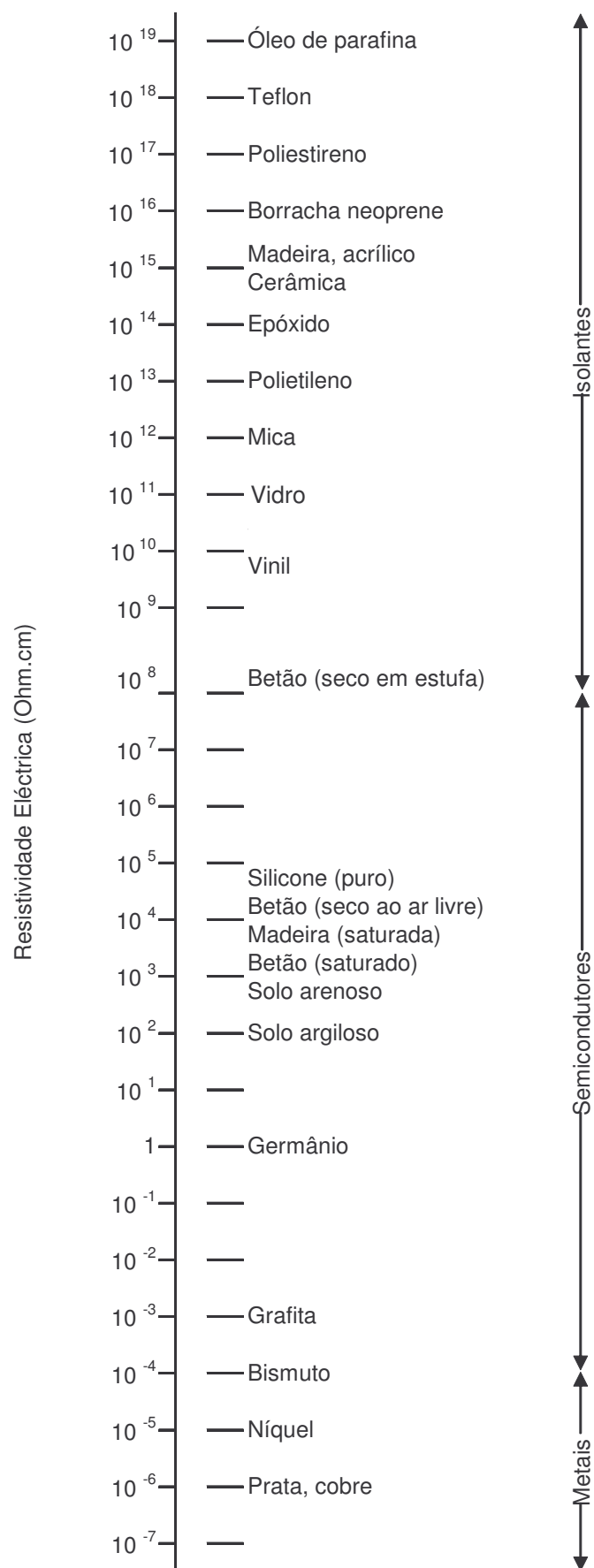


Figura 30 – Resistividade eléctrica de alguns materiais [58]

Nesta teoria, o betão é visto como um material compósito, onde os agregados são as inclusões e a pasta de cimento (ou argamassa) é a matriz. No caso da argamassa, a matriz é a pasta de cimento, enquanto que no betão a matriz é formada pela argamassa.

Em 1873, Maxwell [38] chegou a uma expressão (equação 2) para prever a condutividade de um material compósito. Em função da resistividade, esta expressão fica:

$$\frac{\frac{\rho_m}{\rho} - 1}{\frac{\rho_m}{\rho} + 2} = V_a \frac{\frac{\rho_m}{\rho_a} - 1}{\frac{\rho_m}{\rho_a} + 2} \quad \text{Equação 2}$$

em que:

- $\rho_m$  é a resistividade da matriz;
- $\rho$  é a resistividade do compósito;
- $\rho_a$  é a resistividade das partículas;
- $V_a$  é a fracção de volume das partículas;

Embora a resistividade dos agregados abranja uma vasta gama [35], a maioria das especificações apontam para a utilização de agregados duros e com baixo teor de absorção. Tipicamente, a resistividade destes materiais anda à volta de  $10^5$  Ohm.cm. [42; 59; 63]

Para a matriz, formada por pasta de cimento ou argamassa, tomam-se geralmente valores menores, à volta de  $10^3$  Ohm.cm ou até menos. Na prática, é usual considerar-se que a resistividade dos agregados é infinita quando comparada com a da matriz. Expressando  $V_a$  por  $1 - V_m$ , onde  $V_m$  é a fracção de volume da matriz, então a equação de Maxwell [38] fica reduzida a (equação 3):

$$\rho = \rho_m \frac{3 - V_m}{2V_m} \quad \text{Equação 3}$$

A expressão de Maxwell [38] considera que a fracção de volume de agregado é tão pequena que não existem linhas de corrente em volta das partículas, e que as partículas são esféricas.



Depois de Maxwell [38], surgiram outros modelos teóricos, tal como Fricke [21] e Slawinski [54]. Porém, tais formulações não permitem prever com rigor as propriedades eléctricas de materiais tão complexos como o betão.

A segunda teoria baseia-se em formulações empíricas, estabelecendo relações entre a resistividade eléctrica do material como um todo, e a resistividade da fase condutora. Ajustando dados experimentais a equações simplificadas utilizando a Lei de Archie [49], definem-se alguns coeficientes do material. Conhecendo a resistividade e o volume da fase condutora, é possível prever a resistividade do material.

Em 1942, Archie [49] estabeleceu uma relação entre a resistividade eléctrica de rochas saturadas (principalmente grés), e a resistividade do fluido de que estavam saturadas. Esta relação define o factor de formação  $F$ , e ficou conhecida como a Lei de Archie (equação 4):

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \phi^{-m} \quad \text{Equação 4}$$

em que,

$R_o$  é a resistividade do grés saturado;

$R_w$  é a resistividade do fluido contido no grés;

$\phi$  é a fracção de volume de fluido contido na rocha;

$m$  é um factor de forma;

Esta equação foi mais tarde generalizada para rochas não consolidadas e areias marinhas [38; 34]. Neste caso, obtemos a equação 5:

$$F = A\phi^{-m} \quad \text{Equação 5}$$

em que  $A$  é uma constante. Whittington, et al. [59] aplicaram esta expressão ao betão, definindo  $F$  como a razão entre a resistividade do betão e a resistividade da pasta de cimento. Para isso, prepararam uma série de amassaduras de betão, fazendo variar a razão água/cimento de 0.6 até 0.8. Os provetes foram conservados em câmara húmida durante 128 dias, e então foi medida a resistividade eléctrica. Ajustando os dados medidos à Lei de Archie [49], obtiveram a seguinte expressão (equação 6):

$$F = 1.04\phi^{-1.20} \quad \text{Equação 6}$$

Morelli e Ford [43] levaram a cabo uma série de experiências semelhantes. No entanto, as suas pesquisas tinham por objectivo estudar a evolução da resistividade do betão desde tenra idade (24 horas) até aos 65 dias. Para uma mistura com a/c igual a 0.5, obtiveram um valor de 1.0 para o parâmetro  $A$  e 1.73 para  $m$ . Pode-se então concluir que para betões, o parâmetro  $A$  é sensivelmente constante, enquanto que  $m$  varia de acordo com as características particulares de cada mistura.

### 3.3 FACTORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DO BETÃO

A resistividade eléctrica do betão está intimamente relacionada com a microestrutura da matriz cimentícia, nomeadamente no que diz respeito à porosidade, estrutura e dimensão dos poros, assim como a concentração de iões e a sua mobilidade nos vazios da matriz. [32; 9]

A constituição do cimento, dosagem, razão a/c, a utilização de adições e adjuvantes, inclusão de fibras, assim como diversas condições ambientais são factores que alteram a microestrutura da matriz cimentícia principalmente no que diz respeito à estrutura porosa, que por sua vez irão alterar a resistividades eléctrica do betão.

#### 3.3.1 TIPO DE CIMENTO E DOSAGEM

O tipo, teor em alcali e  $C_3A$  são os factores quimicamente presentes no cimento que mais influenciam a resistividade do betão.

Em 1955, Hammond e Robson [28] estudaram o efeito de três tipos diferentes de cimento na resistividade eléctrica do betão. Para tal, utilizaram Cimento Portland Normal, Cimento Portland de Endurecimento Rápido e Cimento Aluminoso. A razão a/c utilizada foi de 0,49.

A resistividade dos dois cimentos Portland foi muito semelhante. O valor médio às 24 horas para o betão com cimento Portland Normal foi de 2350 Ohm.cm comparado com 2300 Ohm.cm para o betão utilizando Cimento Portland de Endurecimento Rápido.

Passadas 24 horas, o betão confeccionado com Cimento Aluminoso apresentou uma resistividade cerca de 100 vezes maior do que nos restantes tipos ensaiados.

Passados 150 dias, a relação entre a resistividade eléctrica do betão com Cimento Aluminoso e os restantes ensaiados passou para perto de 10.

Esta variação da resistividade poderá ser explicada pela aceleração do processo de hidratação do Cimento Aluminoso. À medida que a hidratação se processa, a quantidade de iões presentes na solução porosa vai diminuindo, daí a maior resistividade do betão com Cimento Aluminoso [58].

No entanto, para idades mais elevadas o Cimento Portland também vai hidratando e também a sua resistividade vai aumentando. Para idades mais avançadas, a diferença de resistividade deve-se provavelmente à diferente composição química dos cimentos.

Em 1968, Monfore [42] mediu a resistividade eléctrica de pastas de  $C_3A$  e silicato tricálsico ( $C_3S$ ). Este autor concluiu que a resistividade da pasta de  $C_3A$  era mais elevada, especialmente para pequenas idades, e atribui este efeito à ausência de hidróxido de cálcio nos produtos de hidratação do  $C_3A$ .

A dosagem de cimento utilizada na composição do betão determina o volume da pasta de cimento e qualquer alteração na dosagem irá reflectir-se na resistividade.

Em 1985, Hughes [32] mediu a resistividade de 12 composições diferentes de betão. Foram utilizados provetes cúbicos de 150 mm de aresta, e efectuadas leituras de resistividade às idades de 1,3,7,14,21 e 28 dias. Para razões a/c de 0.50 e 0.55 foram utilizadas 3 dosagens de cimento: 300, 350 e 400 kg/m<sup>3</sup>.

Estas leituras indicaram uma diminuição da resistividade à medida que a dosagem de cimento aumenta. Para uma razão a/c de 0.5 a resistividade diminui quase 20% aumentando a dosagem de cimento de 300 para 400 kg/m<sup>3</sup>. Para a razão a/c de 0.55, para o mesmo aumento de dosagem de cimento, a resistividade diminuiu 25%.

Este autor concluiu que como a resistividade da pasta de cimento é muito inferior à dos agregados, quanto mais cimento existir num determinado volume de betão, menor será a resistividade.

### **3.3.2 RAZÃO ÁGUA/CIMENTO**

A razão a/c é um dos mais importantes parâmetros de qualidade do betão, afectando as suas características mecânicas assim como a sua durabilidade. Esta razão

desempenha um papel fundamental na microestrutura da matriz, nomeadamente a estrutura e dimensão dos poros, afectando por isso a resistividade eléctrica. [58]

Monfore [42], estudou a relação entre a razão a/c e a resistividade da pasta de cimento. Concluiu que a resistividade da pasta de cimento aumenta à medida que a razão a/c diminui. A resistividade da pasta com a/c 0.40 era cerca do dobro da utilizando a/c de 0.60.

Hughes [31] também estudou a variação da resistividade com a razão a/c utilizando duas dosagens de cimento. O resultados obtidos constam na figura 31.

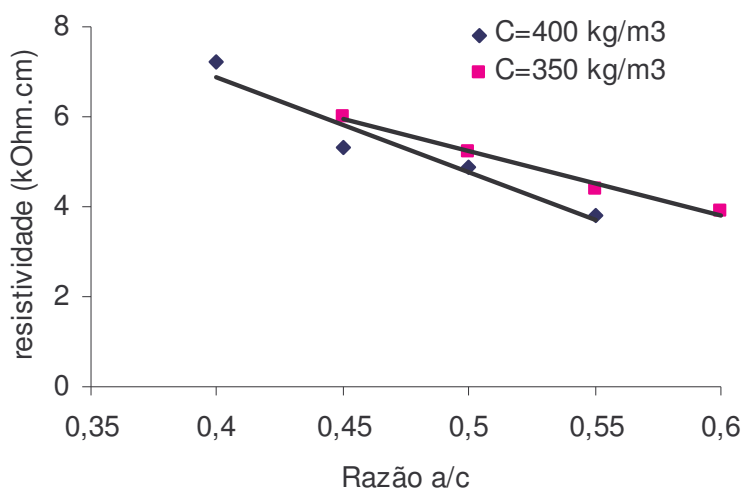


Figura 31 - Efeito da razão a/c na resistividade do betão [31]

A influência da razão a/c na resistividade eléctrica do betão varia com o grau de saturação. O efeito da razão a/c é menos relevante numa amostra saturada quando comparada com uma amostra seca.

Gjorv et al. [24] concluíram que a diminuição da resistividade eléctrica para uma razão a/c de 0.42 até 0.70 é mais pronunciada para um grau de saturação entre 40% e 60%, quando comparada com um grau de saturação de 100% (figura 32).

### 3.3.3 TIPO DE AGREGADO

A resistividade eléctrica dos agregados é muito superior à da pasta de cimento. Monfore [42] mediu a resistividade eléctrica de vários tipos de agregados utilizados na composição de betões, estes valores estão indicados na tabela 4.

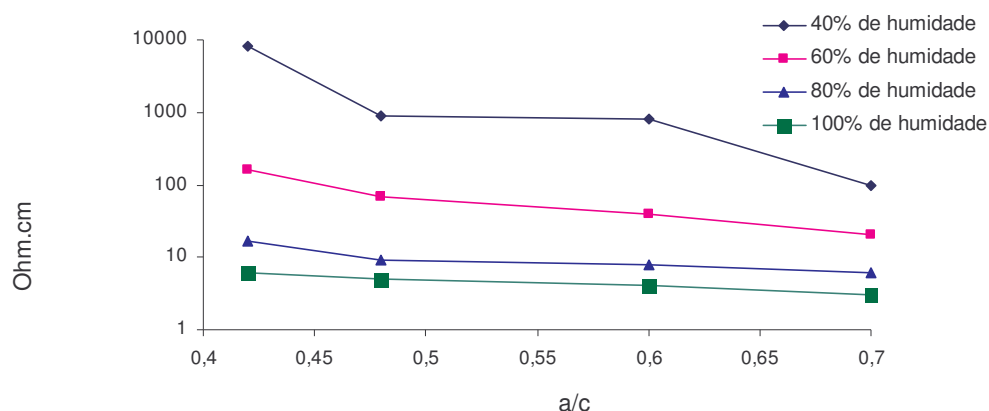


Figura 32 - A influência da razão a/c e do grau de saturação na resistividade [24]

Tabela 4 – Absorção de água e resistividade de vários tipos de agregados [42]

<i><b>Tipo de Agregado</b></i>	<i><b>Absorção de Água (%)</b></i>	<i><b>Resistividade (Ohm.cm)</b></i>
Areia	9.2	18000
Xisto	6.0	30000
Mármore	0.9	290000
Granito	0.34	880000

Como se pode constatar, para os efeitos práticos, a resistividade eléctrica do granito e do mármore é infinita quando comparada com a da pasta de cimento.

Embora seja a pasta de cimento que controla a resistividade, qualquer alteração no tipo de agregado utilizado terá influência na resistividade do betão. Não existem ainda estudos relevantes acerca da influência do tipo de agregado na resistividade do betão. No entanto, não será de estranhar que um betão confeccionado com agregados do tipo “xisto” terá uma resistividade inferior à de um betão confeccionado com agregados do tipo “granito”, mantendo constante os restantes constituintes.

Qualquer aumento na dosagem de agregados resultará num aumento de resistividade. Em 1985, Hughes [31] mediu a resistividade eléctrica de betões com diferentes razões agregado/cimento. Quando a razão agregado/cimento passou de 2.92 para 4.36, a resistividade eléctrica cresceu de 4.86 para 5.73 kOhm.cm, para uma razão a/c de 0.50.

### 3.3.4 ADIÇÕES

As adições minerais mais utilizadas no fabrico de betão são as cinzas volantes, a sílica de fumo e as escórias de alto forno.

Estas adições têm como objectivo aumentar a trabalhabilidade do betão, diminuir a retracção e consequente fissuração, aumentar a resistência mecânica, assim como a resistência ao ataque de sulfatos e outros agentes de degradação, além de permitir reduzir a dosagem de cimento.

Devido às suas características pozolánicas, estes materiais alteram a microestrutura da matriz cimentícia, influenciando a mobilidade dos iões presentes na solução porosa.

Geralmente, estas adições contribuem para uma diminuição da porosidade do betão, o que conduz a uma resistividade eléctrica superior à dos betões confeccionados unicamente com Cimento Portland.

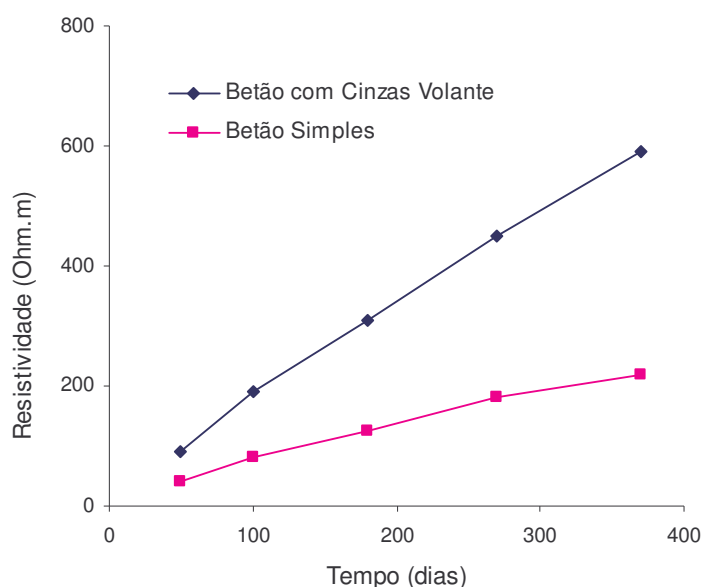


Figura 33 – Efeito da adição de cinzas volantes na resistividade do betão [10]

A influência da presença de cinzas volantes foi estudada em 1994 por Cabrera [10]. Cabrera substituiu 30% de cimento por cinzas volantes, utilizando uma razão a/c de 0.55. A resistividade eléctrica do betão com cinzas volantes é sempre superior à do betão simples, além de que, o incremento de resistividade no tempo é superior.

Devido à sua elevada reactividade e finura, a adição de sílica de fumo conduz a betões cuja estrutura porosa é inferior aquela quando são utilizadas cinzas volantes. Para dosagens correntes a resistividade eléctrica de betões com sílica de fumo é superior à de betões com cinzas volantes [61].

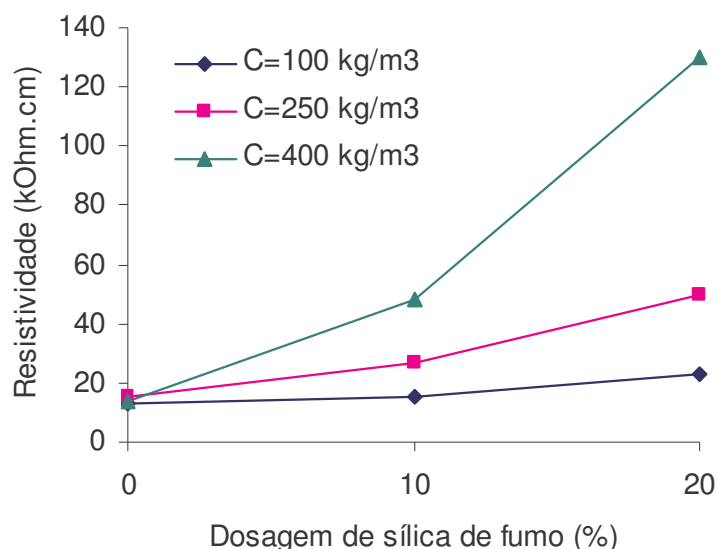


Figura 34 – Efeito da adição de sílica de fumo na resistividade do betão [61]

Bawega [6] estudou o efeito da razão a/c para betões confeccionados com 35% de escórias de alto forno por peso de cimento. A resistividade eléctrica aumentou com a idade para razões a/c de 0.45 e 0.55 e foi superior à resistividade de provetes de betão simples. No entanto, para uma razão a/c de 0.65 a resistividade do betão com escórias de alto forno diminuiu para idades avançadas.

Este autor também registou que a resistividade de amostras com 25% de cinzas volantes foi superior do que aqueles confeccionados com 35% de escórias de alto forno, especialmente para razões a/c de 0.65.

### 3.3.5 ADJUVANTES

Adjuvantes são materiais que se utilizam em muito pequena quantidade, tendo em vista modificar ou conferir ao betão uma qualidade específica. Adicionando adjuvantes ao betão podemos melhorar a sua qualidade, aumentar a resistência à acção do gelo, acelerar ou retardar a presa, aumentar a trabalhabilidade, entre outros.



Os adjuvantes mais comuns são os introdutores de ar, plastificantes e super plastificantes, inibidores de corrosão, produtos que melhoram a aderência, produtos que melhoram a resistência à acção biológica, etc.

A influência dos adjuvantes na resistividade eléctrica do betão ainda não é um tema muito desenvolvido. No entanto, é de esperar que a influência destes materiais seja de menor importância de que outros já abordados. Por exemplo, a utilização de um super plastificante permite a redução da razão a/c sem prejudicar a trabalhabilidade. A diminuição da razão a/c irá resultar num aumento da resistividade eléctrica.

Podemos então afirmar que este tipo de adjuvante tem um efeito indirecto sobre a resistividade do betão. Além disso, a redução da razão a/c poderá influenciar a concentração iónica na solução porosa da matriz, mas devido às reduzidas dosagens dos adjuvantes este efeito deverá ser mínimo [58].

### **3.3.6 CLORETOS**

Durante muitos anos, a utilização de sal (NaCl) como acelerador de presa do betão foi prática corrente. No entanto, actualmente esta prática deixou de ser utilizada devido ao elevado risco de corrosão induzido pela acção de cloretos nas estruturas de betão armado e pré-esforçado. O estudo da influência da presença de cloretos na resistividade eléctrica do betão continua a ser um tema de grande interesse.

O efeito da concentração de cloretos na resistividade eléctrica do betão foi estudada por Henry (1964) em provetes com razão a/c de 0.44. foram realizadas diversas amassaduras, adicionando sal (NaCl) à água do betão, num intervalo de 0 a 31.3 g/Kg de cimento. Henry verificou que o betão com 0 g de NaCl apresentou a resistividade mais elevada em todo o período de leitura. No entanto, segundo este autor, a diferença de valores de resistividade entre os diversos betões não é suficientemente significativa, por forma a permitir estabelecer com segurança e aplicabilidade uma relação entre a resistividade eléctrica do betão e a respectiva concentração de cloretos. [59]

### 3.3.7 PRÁTICAS CONSTRUTIVAS

Não existe ainda muita informação acerca da influência das práticas construtivas na resistividade eléctrica do betão, no que diz respeito à mistura, transporte e colocação. No entanto, Monfore [42] concluiu que para betão fresco o grau de consolidação influencia a resistividade eléctrica. Desta forma a medida da resistividade permite aferir o grau de consolidação do betão fresco.

À medida que aumenta o grau de consolidação do betão fresco, diminui a sua resistividade eléctrica devido à expulsão do ar no interior do betão fresco durante o processo de vibração. Esta relação foi utilizada na indústria da pré fabricação para otimizar os tempos de vibração. [58]

### 3.3.8 TEMPERATURA

A temperatura desempenha um papel importante na resistividade eléctrica do betão.

A resistividade é em grande parte resultado da fase líquida presente nos poros do betão. À medida que a temperatura aumenta, diminui a viscosidade do fluido, aumentando a mobilidade dos iões que transportam a corrente. Isto conduz à diminuição da resistividade do material.

Esta relação pode ser expressa pela Lei de Rasch e Hinrichsen [49] através da equação 7:

$$R_2 = R_1 \times e^{\left(\frac{A}{T_2} - \frac{A}{T_1}\right)} \quad \text{Equação 7}$$

em que:

R1 é a resistividade à temperatura T1;

R2 é a resistividade à temperatura T2;

T1,T2 são as temperaturas em Kelvin;

A é uma constante;

### 3.3.9 HUMIDADE

Entre todas as variáveis já abordadas, a humidade é certamente aquela que mais influencia a resistividade eléctrica do betão.

À medida que a humidade do betão diminui, diminui a quantidade de água presente nos poros que transporta a corrente, aumentando assim a resistividade. Hunkeler [32] verificou que a condutividade eléctrica do betão anula-se para uma humidade relativa próxima de 40%. Embora a matriz cimentícia ainda contenha bastante água para esta humidade relativa, aquela retida nos poros acaba por ter um comportamento não condutor. Tal deve-se às tensões superficiais que tornam imóveis os iões dissolvidos nos poros.

No caso do betão totalmente seco, Hammond e Robson [27] obtiveram uma resistividade eléctrica de 40 GΩ.cm.

Para um determinado grau de saturação, a razão a/c também influencia a resistividade eléctrica. À medida que aumenta a razão a/c a resistividade diminui. Este efeito é mais pronunciado para graus de saturação mais baixos (figura 35).

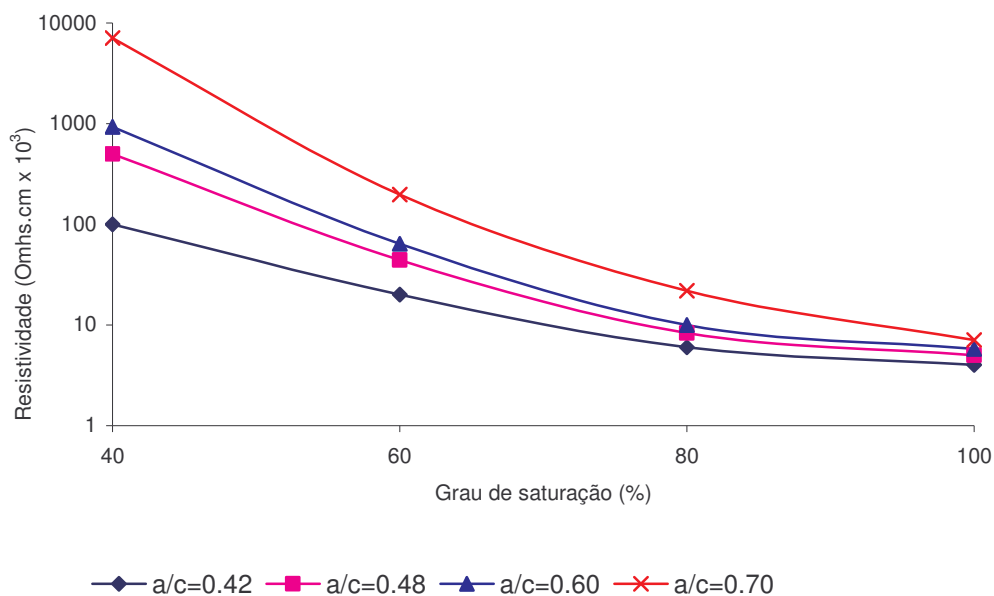


Figura 35 – Efeito do grau de saturação e da razão a/c na resistividade eléctrica do betão [24]

### 3.4 A RESISTIVIDADE DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO

Segundo Gonzalez, J. [25], o betão com fibras apresenta comportamentos peculiares quando atravessado por uma corrente eléctrica, diferindo no seu comportamento do betão simples.

A adição de fibras permite estabelecer pequenos troços condutores na matriz e, desse modo, melhorar as condições de condutividade eléctrica. Ao contrário do que acontece no betão convencional, onde a passagem da corrente se pode realizar principalmente através da fase líquida, porque se processa por via electrolítica.

A fracturação que se desenvolve no interior da matriz provoca a interrupção da fase líquida, e consequentemente, da corrente que a utiliza como via. Porém, a existência de fibra, permite dentro de certos limites, assegurar a continuação da passagem da corrente mesmo quando se verifica a fractura.

Dependendo do estado de fissuração, o movimento relativo das duas superfícies de fractura permite o encosto/separação das extremidades das fibras, fazendo com que a alteração das propriedades da corrente eléctrica reflectam as condições de tensão/extensão.

Assim, medindo a intensidade e a diferença de potencial, ddp, da corrente em cada momento, é possível determinar a variação da resistividade e, através desta, o estado de fissuração. Pu Woei [60], através de experiências sobre compósitos de fibras de carbono, demonstrou haver uma relação directa entre o estado de tensão e da resistividade do material.

Gonzalez [25], conclui que em provetes reforçados com 1% de fibra de carbono, é possível estabelecer uma relação linear entre a intensidade da corrente eléctrica e o deslocamento e entre a intensidade da corrente eléctrica e a respectiva força. A análise do comportamento de provetes mostra sensibilidade eléctrica quando submetidos a carregamento cíclico, apresentando um troço com uma relação linear entre a intensidade e a tensão/deformação para os valores máximos de tensão em cada ciclo.

Os coeficientes de ajustamento e os parâmetros das rectas de regressão  $I=mf+c$ , dos gráficos apresentados na figura 36 e  $I=md+c$ , da figura 37, encontram-se na tabela 5. [25]

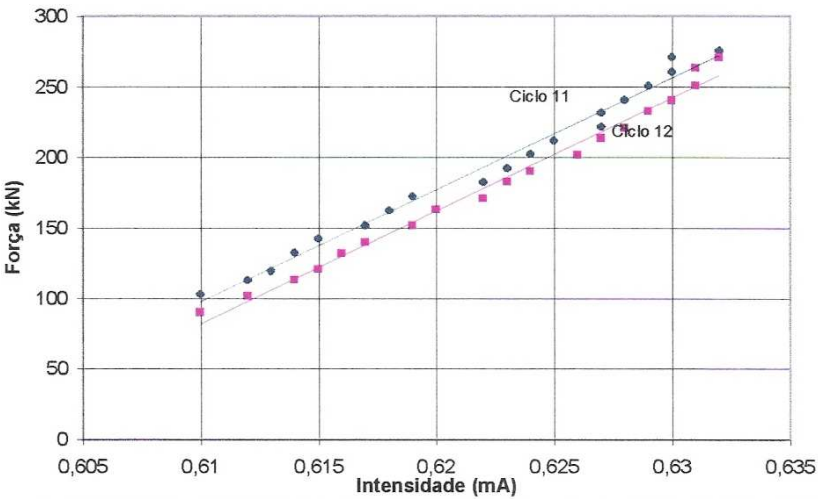


Figura 36 – Relação entre a Intensidade e a Força. Betão com Fibra (1%) [25]

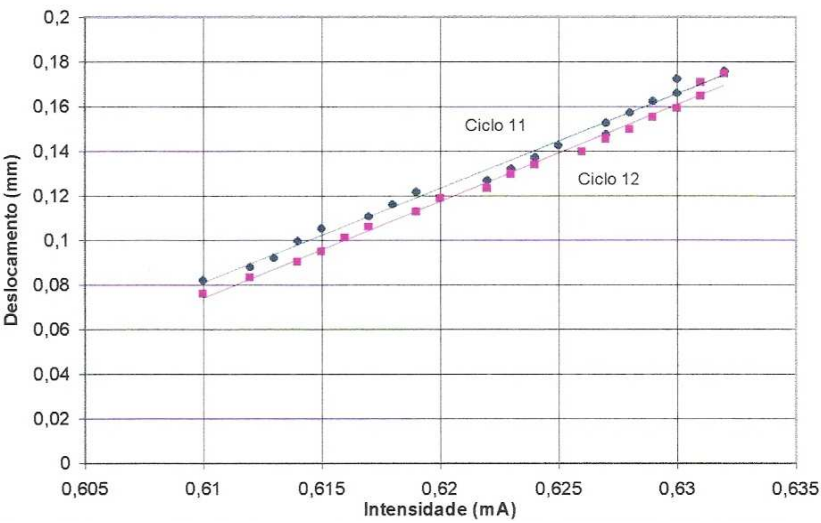


Figura 37 – Relação entre a Intensidade e o deslocamento. Betão com Fibra (1%) [25]

Tabela 5 – Parâmetros das rectas de ajustamentos [25]

<b>Intensidade vs Força</b>	<b>m</b>	<b>c</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Ciclo 11	7935.3	-4782.8	0.987
Ciclo 12	8002.1	-4799.1	0.9887
<b>Intensidade vs Deslocamentos</b>			
Ciclo 11	<b>4.2372</b>	<b>-2.5039</b>	0.9900
Ciclo 12	4.3378	-2.5722	0.9800

Gonzalez concluiu que os resultados obtidos confirmam a potencialidade de se utilizar o CFRC como auto-sensor em edifícios inteligentes, estabelecendo uma relação entre medições de corrente com um estado de extensão / fendilhação do material. [25]

### 3.5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A resistividade eléctrica do betão é um parâmetro que possibilita aferir a qualidade e a durabilidade do betão, representando-se geralmente por  $\Omega.m$  (Ohm metro).

O grau de hidratação da pasta de cimento é o principal responsável pelas propriedades condutoras do betão, o que implica um aumento da resistividade à medida que o betão endurece, devido à redução do volume de água na matriz cimentícia durante o processo de hidratação do cimento.

Existem basicamente duas teorias para explicar a resistividade eléctrica do betão: formulações puramente teóricas tal como a expressão de Maxwell, e formulações baseadas em dados laboratoriais, tal como a Lei de Archie. No entanto, tais formulações não permitem com rigor prever as propriedades eléctricas de um material tão complexo como o betão.

Os valores da resistividade eléctrica do betão deverão ser cuidadosamente interpretados, tal é o número de variáveis que influenciam este parâmetro. Entre estas variáveis, constam o tipo e dosagem de cimento, a razão água / ligante, o tipo e dosagem de agregados, as adições e adjuvantes, práticas construtivas, temperatura e humidade.

O estudo da variação da resistividade eléctrica em provetes de betão reforçado com fibras de carbono (CFRC) submetidos a carregamento permitiu estabelecer uma relação linear entre a intensidade da corrente eléctrica e a respectiva força e deslocamento, confirmando a potencialidade de se utilizar a resistividade eléctrica do CFRC como “auto-sensor” para estimar o estado de tensão/extensão do material.

## **MATERIAIS E COMPOSIÇÕES UTILIZADAS**

---

*capítulo quatro*

## 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

### 4.1.1 CIMENTO PORTLAND DE CALCÁRIO

O Cimento utilizado durante este trabalho foi do tipo I, Classe 42.5R, certificado segundo a NPEN 197-1 [46]. O cimento foi fornecido pela SECIL Companhia Geral de Cal e Cimentos, S.A..

Apresentam-se nas tabelas 6 a 9 as propriedades químicas, físicas, componentes potenciais e propriedades mecânicas do cimento utilizado. Estes dados foram obtidos a partir de fichas fornecidas pelo fabricante, excepto a tabela 8 que apresenta os componentes potenciais do cimento. Estes valores foram calculados a partir das equações de Bogue [19].

Tabela 6 – Composição química do cimento utilizado

COMPOSIÇÃO	SÍMBOLO	%
Óxido de Silício	SiO <sub>2</sub>	20.34
Óxido de Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.05
Óxido de Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.96
Óxido de Cálcio	CAO	63.01
Óxido de Magnésio	MgO	2.58
Sulfatos	SO <sub>3</sub>	2.90
Óxido de Potássio	K <sub>2</sub> O	...
Óxido de Sódio	Na <sub>2</sub> O	...
Cloretos	Cl <sup>-</sup>	0.02
Cal Livre	...	1.31
Não Determinado	...	1.77
Perda ao Fogo	...	2.40
Resíduo Insolúvel	...	0.90

Tabela 7 – Propriedades físicas do cimento utilizado

PROPRIEDADES	VALOR
Massa Volúmica (g/cm <sup>3</sup> )	3.17
Resíduo Seco <45μ (%)	4.7
Superfície Específica de Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3908
Água na Pasta Normal	28.6
Início de Presa (min)	104
Fim de Presa (min)	138
Expansibilidade – Le Châtelier (mm)	1.0



Tabela 8 – Componentes potenciais do cimento utilizado [19]

COMPOSIÇÃO	SÍMBOLO	%
Silicato Tricálcico	C <sub>3</sub> S	43.7
Silicato Bicálcico	C <sub>2</sub> S	7.8
Aluminato Tricálcico	C <sub>3</sub> A	5.7
Aluminoferato Tetracálcico	C <sub>4</sub> AF	9.0
Silicato de Cálcio Hidratado	CSH	4.9

Tabela 9 – Propriedades Mecânicas do cimento utilizado

RESISTÊNCIAS	MPa
Flexão (28 dias)	9.4
Compressão (2 dias)	30.1
Compressão (28 dias)	52.5

#### 4.1.2 AGREGADO GROSSO

O agregado grosso utilizado foi uma brita granítica com máxima dimensão de 19.1mm, extraída de uma pedreira da freguesia de Joane, concelho de Vila Nova de Famalicão. A massa volúmica específica do agregado é 2330 kg/m<sup>3</sup> e o teor de absorção de água é 2.44%. Estes valores foram calculados segundo o procedimento descrito na norma NP-954 [47]. O resultado da análise granulométrica do agregado, realizado de acordo com a NP-1379 [45], está apresentado na tabela 11, assim como a respectiva curva granulométrica consta na figura 39.

#### 4.1.3 AGREGADO FINO

O agregado fino utilizado é uma areia rolada, obtida a partir de depósitos fluviais, com dimensão máxima de 4.76mm. A massa volúmica específica da areia é de 2520 kg/m<sup>3</sup>, e o teor de absorção em água é 1.70%. estes valores foram calculados segundo o procedimento descrito na norma NP-954 [47]. O resultado da análise granulométrica, realizado de acordo com a NP-1379 [45], apresenta-se na tabela 10, apresentando-se na figura 39 a respectiva curva granulométrica.

#### 4.1.4 ÁGUA

Foi utilizada água da rede pública de abastecimento da cidade de Guimarães, satisfazendo as exigências da NP-ENV 206 [48] e da especificação do LNEC E-372

[17]. Não foi realizado qualquer estudo sobre a água visto que a norma mencionada considera que a água potável é adequada para confeccionar betões e argamassas.



Figura 38 – Areia utilizada

Tabela 10 - Análise granulométrica dos agregados, % de material passado

PENEIRO (ASTM)	BRITA GRANÍTICA	AREIA ROLADA
3/4"	100.0%	100.0%
1/2"	85.8%	100.0%
3/8"	32.6%	100.0%
4	0.1%	99.0%
8	0.1%	89.7%
16	0.1%	63.9%
30	0.1%	33.3%
50	0.1%	11.5%
100	0.1%	3.4%
200	0.1%	1.7%
<b>Módulo de Finura</b>	<b>6.667</b>	<b>2.991</b>

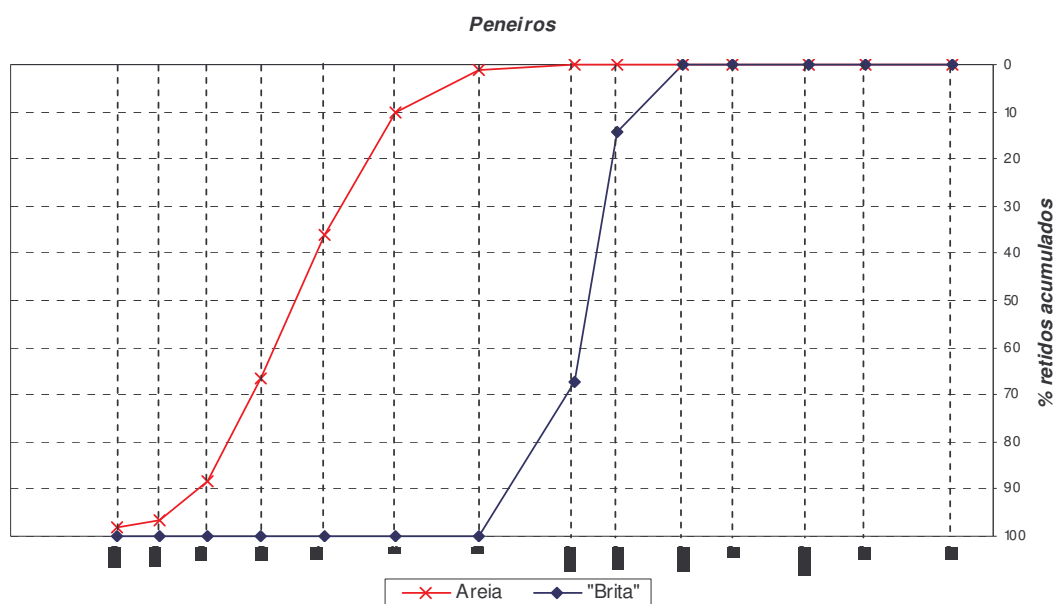


Figura 39 – análise granulométrica dos agregados utilizados

#### 4.1.5 FIBRAS DE CARBONO

As fibras de carbono utilizadas foram produzidas por Kureha Chemicals com a referência KFC – 100. A fibra é da classe carbono, variedade “pitch” com as características físicas indicadas na tabela 11.

Tabela 11 – Características físicas da fibra utilizada

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	18
Resistência à Tração (MPa)	590
Módulo de Elasticidade (GPa)	30
Alongamento à Ruptura (%)	2.0
Resistividade Volumétrica ( $\mu\Omega\text{m}$ )	150
Densidade	1.65
pH	6-8
Teor de Carbono (%)	95

#### 4.1.6 POLÍMERO

O polímero utilizado foi do tipo “Silastic” (figura 40). Este é constituído por duas fases: base e catalizador, misturados segundo as instruções do fabricante na proporção 1:10 (catalizador: base). Depois de efectuada a mistura, basta esperar cerca de seis horas até o material ganhar a consistência máxima.



Figura 40 – Polímero utilizado (catalizador e base)

#### 4.2 ESTUDO DAS COMPOSIÇÕES UTILIZADAS

#### 4.2.1 ARGAMASSA

Ao longo de todo o trabalho de investigação, foram moldados vários provetes prismáticos de argamassa, com dimensões 4x4x16 cm, ao traço 1:3:0.5 (C:M:W), com as dosagens de constituintes estão indicadas na tabela 12.

Tabela 12 – composição das argamassas utilizadas

Constituinte	Argamassa Padrão*	Argamassa com Fibra*	Por m <sup>3</sup> de argamassa
Cimento	450 g	450g	585.94 kg
Areia	1350 g	1350 g	1757.81 kg
Água	225 g	225 g	292.97 kg
Fibra de Carbono (curta)	0	4.5 g (1% C)	5.85 kg

\*Dosagens para obter 3 provetes

Para posteriormente medir a resistividade das argamassas foram colocadas duas redes nas extremidades do provete, conforme está indicado na figura 41. Na figura 42 é apresentado um provete que foi parcialmente destruído, de forma a indicar a localização das redes.

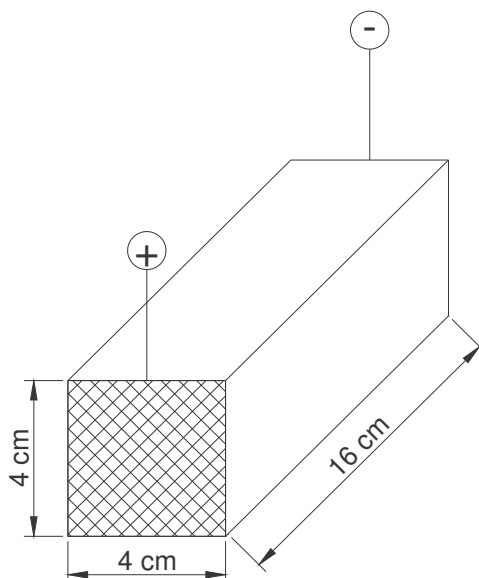


Figura 41 – Provette prismático de argamassa



Figura 42 – Provette prismático parcialmente destruído

#### 4.2.2 BETÃO

As composições de betão foram estudadas através do método de Faury e destinam-se a um betão simples, sujeito à classe de exposição 2a segundo a NP ENV 206 [48]. A dosagem de cimento foi fixada em 350 kg/m<sup>3</sup>. Para as composições com fibras de carbono, utilizou-se uma dosagem de 1% de fibra em relação ao peso de cimento, conforme indicado na tabela 13.

Tabela 13 – Constituição do betão

Constituinte	Betão simples (kg/m <sup>3</sup> )	Betão com fibra (kg/m <sup>3</sup> )	Razão w/c
Cimento	350.0	350.0	0.547
Areia	922.1	922.1	
Brita	854.9	854.9	
Água	191.5	191.5	
Fibra de Carbono	0	3.5	

Parâmetros da fórmula de Faury para o cálculo da água de amassadura: K=0.34; K'=0.003

Parâmetros da curva de Faury: A=26; B=1.5; R/D=1

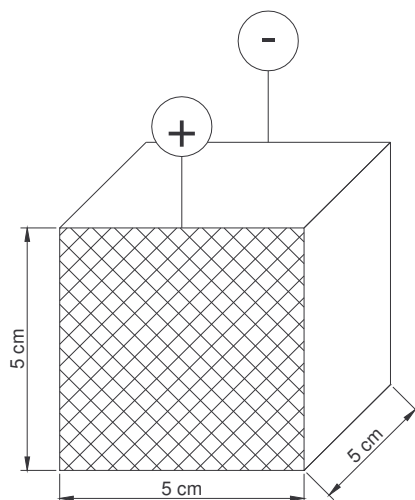


Figura 43 – Provete cúbico de betão

#### 4.2.3 FABRICO DE AMASSADURAS E CURA

O fabrico das amassaduras foi realizado recorrendo a uma misturadora de eixo vertical (figura 44). De modo a assegurar a dispersão das fibras de carbono, estas foram previamente passadas pelo peneiro de 2.38 mm (# n.º 8 ASTM).

Devido à tendência de estas fibras se aglomerarem formando novelos, optou-se por fazer as amassaduras começando pela parte líquida. Colocou-se na misturadora a

água e as fibras, deixando a funcionar durante 30 segundos, depois foi colocado o cimento, a areia e no caso do betão, a brita.

No caso da argamassa e do betão simples o procedimento foi o mesmo, não havendo neste caso a inclusão das fibras.

No caso de provetes de betão, a mistura foi colocada nos moldes em duas camadas consecutivas, sendo cada uma delas vibrada numa mesa vibratória durante 15 segundos, de modo a libertar o máximo de ar possível sem comprometer a homogeneidade da mistura.

Depois da moldagem, os provetes permaneceram cerca de 24 horas ao ar livre, no laboratório à temperatura ambiente. De seguida foram desmoldados e colocados numa câmara de cura dentro de água, à temperatura de  $21 \pm 2$  °C, até à data do ensaio.



Figura 44 – Misturadora utilizada para o fabrico das amassaduras

## **O EFEITO DA TEMPERATURA NA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA DA ARGAMASSA**

---

*capítulo cinco*



## 5.1 INTRODUÇÃO

Como já foi referido, a temperatura desempenha um papel muito importante no valor da resistividade eléctrica do betão.

Com este estudo, pretendeu-se avaliar como é que as oscilações de temperatura influenciam o valor da resistividade, e pretendeu-se ajustar o fenómeno a uma lei matemática que permita converter um valor de resistividade lido a uma determinada temperatura para um valor a uma temperatura padrão.

## 5.2 METODOLOGIA UTILIZADA

Foram utilizados provetes prismáticos (4x4x16) de argamassa simples e argamassa com fibras de carbono (3 de cada) com uma idade de 90 dias. O ensaio foi dividido em duas partes:

1. Temperaturas superiores a 10<sup>º</sup> C;
2. Temperaturas inferiores a 10<sup>º</sup> C;

Tal divisão deveu-se apenas ao tipo de equipamento utilizado. Para temperaturas inferiores a 10<sup>º</sup>C recorreu-se ao equipamento utilizado para ensaios de ciclo gelo/degelo (figura 45). Este equipamento tem a vantagem de permitir atingir temperaturas negativas, permitindo mesmo assim manter os provetes imersos em líquido (anti-congelante).



Figura 45 – Equipamento utilizado para temperaturas inferiores a 10<sup>º</sup>C



Para temperaturas superiores a 10°C recorreu-se ao equipamento utilizado para ensaios de expansibilidade do cimento (figura 46), onde é possível colocar o provete dentro de água até cerca de 100 °C. Optou-se por fazer variar a temperatura desde de cerca de -10°C até cerca de 55°C. Para tal, fez-se variar a temperatura do líquido (água ou anti-congelante conforme o equipamento) e esperou-se até a temperatura estabilizar. Depois os provetes eram imersos no líquido e esperava-se cerca de 30 minutos. Após este tempo registava-se a temperatura e media-se a resistência eléctrica do provete.

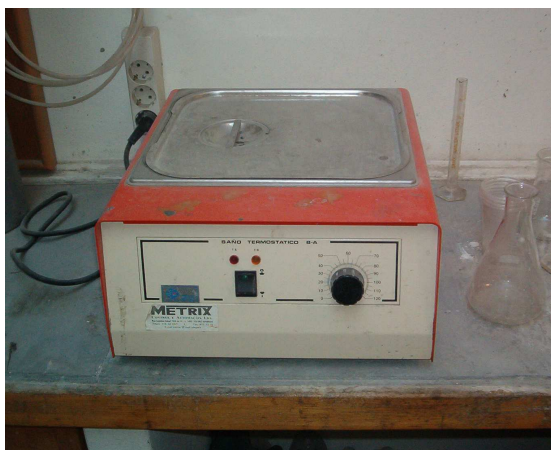


Figura 46 – Equipamento utilizado para temperaturas superiores a 10°C

Para aferir a resistividade eléctrica do provete começou-se por determinar a intensidade da corrente eléctrica que o atravessa. Para tal, utilizou-se uma fonte de alimentação que aplicava ao provete uma diferença de potencial (ddp) de 12 V dc (corrente contínua). No circuito (figura 47), foi introduzida uma resistência de 1 Ohm, com o objectivo de determinar a ddp, para posteriormente determinar, com base na Lei de Ohm (equação 8), a intensidade da corrente que atravessa todo o circuito.

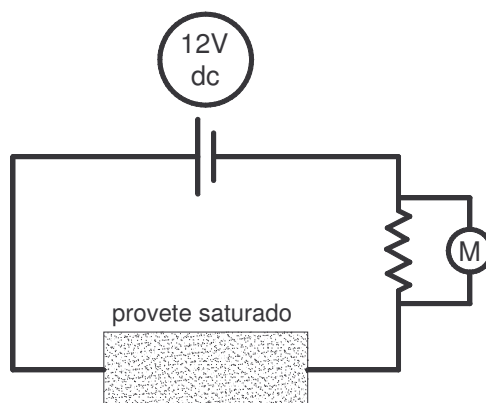


Figura 47 – Circuito eléctrico para medir a resistência eléctrica do betão / argamassa

$$V = R \times I$$

Equação 8

Onde,

V: diferença de potencia (Volts);

R: resistência eléctrica (Ohms);

I: intensidade de corrente (Ampere).

Como se utiliza uma resistência eléctrica de valor 1 Ohm, vem que:

$$V=I$$

Equação 9

Ou seja, embora se estivesse a medir a ddp (Volts), indirectamente estava-se a medir a intensidade (Ampere) da corrente que atravessa todo o circuito.

Este método tem como principal vantagem a maior estabilidade das leituras, devido à capacitância (*capacidade de armazenar energia eléctrica*) do betão que provoca oscilações na leitura directa da sua resistência eléctrica.

A resistividade eléctrica do provete é determinada aplicando a Lei de Ohm:

$$R = \frac{V}{I}$$

sendo,

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

logo, a resistividade eléctrica será obtida pela equação 10:

$$\rho = \frac{V \cdot A}{L \cdot I}$$

Equação 10

onde:

R: resistência eléctrica (Ohms);

I: intensidade de corrente (Amperes);

V: diferença de potencial (Volts);

L: comprimento (cm);

A: área (cm<sup>2</sup>).

### 5.3 RESULTADOS OBTIDOS

Os valores apresentados nas tabelas 14 e 15 resultam da média das leituras de três provetes, para uma ddp de 12V (dc). É igualmente apresentado o valor do desvio padrão das leituras de intensidade para cada valor de temperatura.

Tabela 14 – Resistividade eléctrica de provetes com fibra

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Intensidade (mA)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Resistividade (kΩ.cm)</b>
-11,0	0,571	0,024	21,03
-7,0	0,717	0,030	16,74
3,3	1,446	0,043	8,30
6,3	1,690	0,010	7,10
10,0	1,796	0,009	6,68
14,0	1,964	0,106	6,11
17,8	2,437	0,038	4,92
20,1	2,742	0,030	4,38
22,2	2,730	0,019	4,40
25,0	3,064	0,052	3,92
30,5	3,522	0,077	3,41
34,0	3,678	0,066	3,26
41,0	4,126	0,067	2,91
46,0	4,441	0,058	2,70
54,0	4,696	0,111	2,56

Tabela 15 – Resistividade eléctrica de provetes simples

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Intensidade (mA)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Resistividade (kΩ.cm)</b>
-11,0	0,603	0,021	19,89
-7,0	0,786	0,019	15,26
3,3	1,537	0,029	7,81
6,3	1,696	0,015	7,08
10,0	1,821	0,047	6,59
14,0	1,996	0,065	6,01
17,8	2,375	0,075	5,05
20,1	2,764	0,021	4,34
22,2	2,730	0,019	4,40
25,0	3,092	0,009	3,88
30,5	3,463	0,091	3,47
34,0	3,756	0,098	3,20
41,0	4,175	0,088	2,87
46,0	4,505	0,076	2,66
54,0	4,782	0,080	2,51

## 5.4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Em ambas as situações, provetes simples e com fibras de carbono, é visível a diminuição da resistividade eléctrica com o aumento da temperatura.

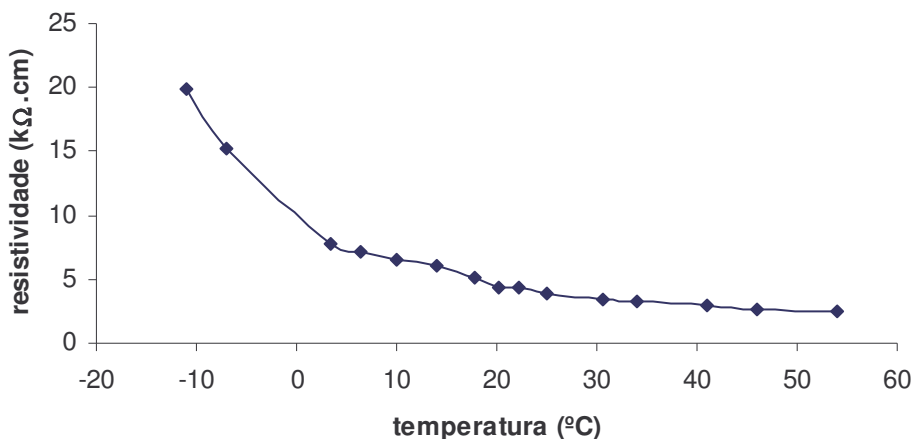


Figura 48 – Variação da resistividade com a temperatura em provetes simples

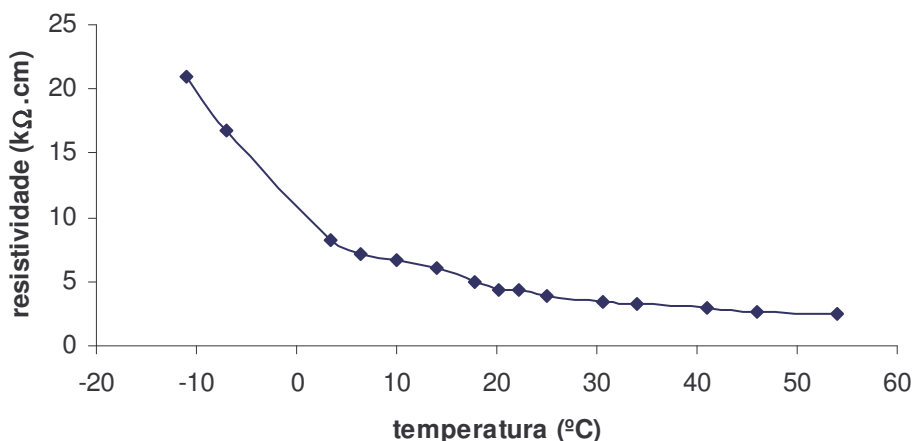


Figura 49 – Variação da resistividade com a temperatura em provetes com fibra

Comparando os valores de resistividade dos provetes de argamassa simples e argamassa com fibras de carbono (figura 50) podemos concluir que são semelhantes, embora ligeiramente mais elevado nos provetes com fibra. Esta diferença muito pequena poderá dever-se ao facto das fibras de carbono funcionarem como condensador, armazenando energia eléctrica.

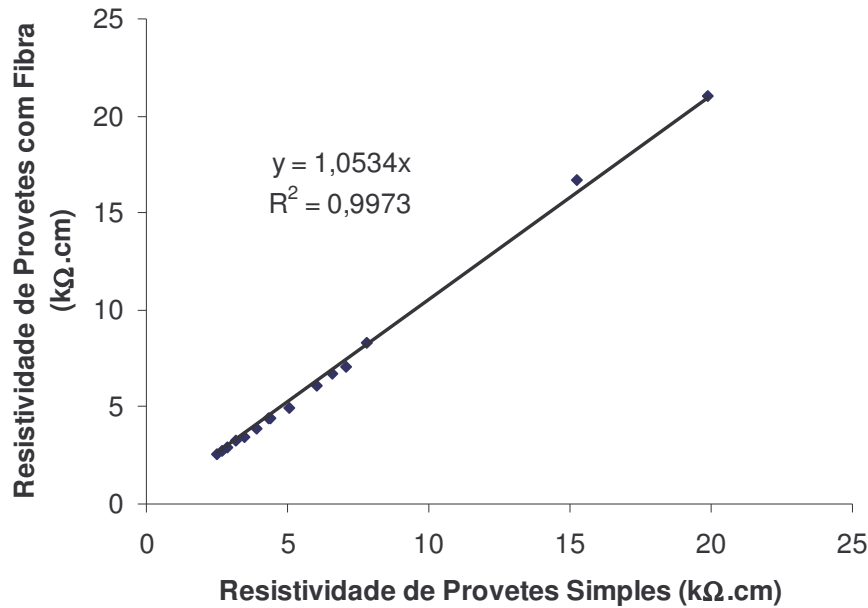


Figura 50 – Comparação entre as leituras de resistividade em provetes simples e com fibras

Com base nos resultados obtidos, facilmente constata-se da importância da temperatura no valor da resistividade eléctrica. Portanto, torna-se fundamental indicar uma *Lei* que permita converter valores de resistividade a uma temperatura  $T$ , para uma temperatura padrão  $T_0$ .

Assumindo que a condutividade eléctrica é função da possibilidade do movimento de iões na fase líquida da argamassa, isto é, migração de iões devido a um potencial eléctrico, pode-se prever que a condutividade varie com a temperatura do mesmo modo que varia a difusão dos iões na fase líquida com a temperatura. A variação da difusão com a temperatura é governada pela equação sugerida por Arrhenius, do tipo:

$$D = D_0 \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \quad \text{Equação 11}$$

Assim, para a variação da condutividade eléctrica com a temperatura é sugerida uma equação do tipo:

$$C = C_0 \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \quad \text{Equação 12}$$

onde:

C: condutividade a qualquer temperatura;

$C_0$ : condutividade quando a temperatura tende para infinito;

E: energia de activação;

R: constante universal dos gases (8.314 J/mol.K);

T: temperatura absoluta (K);

Estabelecendo a mesma igualdade, mas trabalhando em função do logaritmo de C e o inverso da temperatura (absoluta), obtém-se a relação linear entre as duas variáveis, cujo declive da recta traduz o calor do quociente entre a energia de activação (E) e o valor da constante dos gases perfeitos (R). Esta relação está representada na equação 13.

$$\ln(C) = \ln(C_0) + \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad \text{Equação 13}$$

Como esta equação está relacionada com o movimento dos iões no interior do material, será mais correcto analisar o fenómeno em termos de condutividade e não resistividade. A condutividade é o inverso da resistividade e representa-se por  $(\Omega m)^{-1}$ . os resultados obtidos encontram-se representados nas figuras 51 e 52.

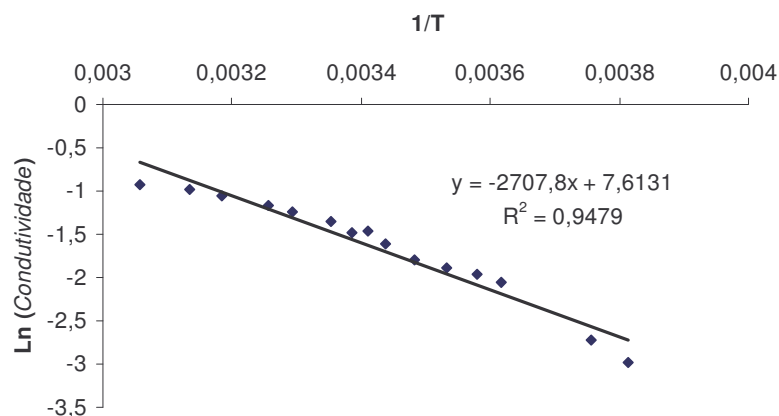


Figura 51 – Aplicação da Lei de Arrhenius à resistividade de argamassa simples

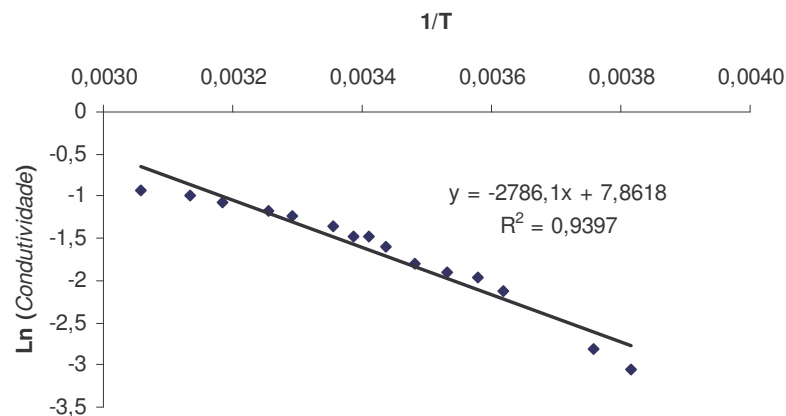


Figura 52 – Aplicação da Lei de Arrhenius à resistividade de argamassa com fibra

Com base nos coeficientes de correlação obtidos, podemos concluir que a Lei de Arrhenius permite relacionar o valor da resistividade eléctrica com a temperatura. No entanto, para temperaturas inferiores a zero nota-se que a curva distancia-se dos pontos obtidos. Retirando estes pontos, obtém-se os resultados apresentados na figura 53.

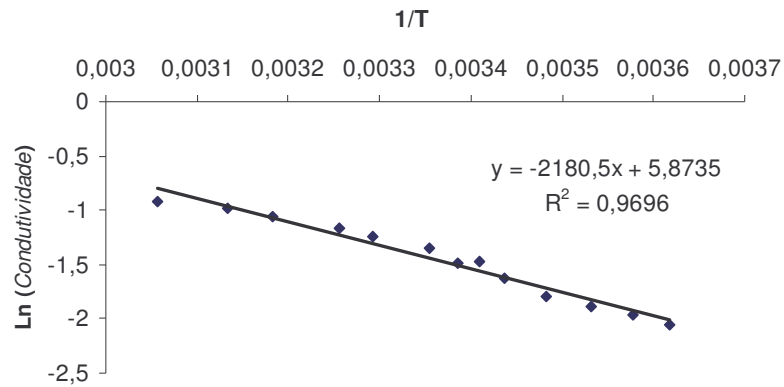


Figura 53 – Aplicação da Lei de Arrhenius a provetes simples – temperaturas positivas

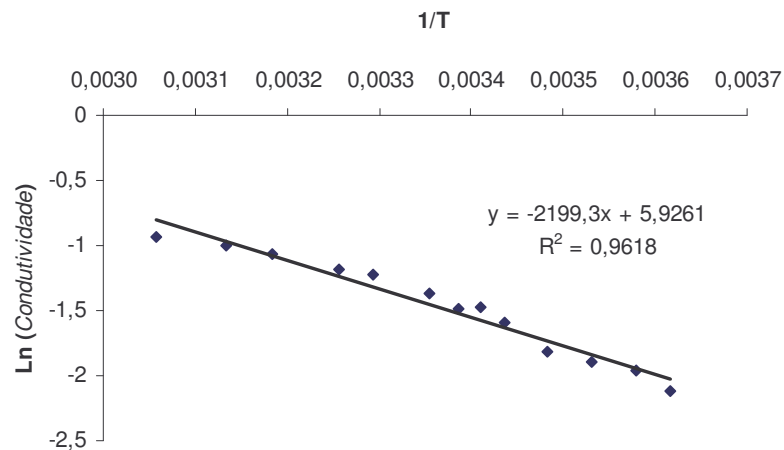


Figura 54 – Aplicação da Lei de Arrhenius a provetes com fibra – temperaturas positivas

Neste caso, para temperaturas positivas, obtém-se os seguintes parâmetros para a equação 13:

Argamassa simples:

Energia de activação: 18133.29 J/mol

$C_0$ : 355,49 (kΩ.cm)<sup>-1</sup>

Argamassa com fibras de carbono:

Energia de activação: 18289.38 J/mol

$C_0$ : 374.69 (kΩ.cm)<sup>-1</sup>

## 5.5 CONCLUSÃO

Podemos então concluir que uma equação do tipo de Arrhenius pode ser utilizada para estabelecer uma relação entre a temperatura e a condutividade eléctrica de provetes de argamassa simples e com fibra de carbono, sendo os parâmetros desta relação válidos quando se trata de temperaturas superiores a 0°C, isto é, a migração dos iões ocorre na fase líquida. Para temperaturas mais baixas, quando a fase líquida passa a sólida, os parâmetros da relação serão diferentes. Sabendo que a difusão nos sólidos ocorre mais lentamente, é de esperar que a energia de activação seja menor ou que o movimento dos iões na fase sólida (gelo) seja menos sensível à temperatura. Isto pode ser constatado com o declive da recta que passa pelos pontos correspondentes a temperaturas negativas (ver figura 54).

Relativamente à energia de activação, existe uma variação muito reduzida entre a argamassa simples e com fibras de carbono, cerca de 0.8%. À face destes valores, pode-se referir que a argamassa com fibra é mais sensível à variação da temperatura, o que pode ser justificado com a presença de fibras, que são sensíveis à variação da temperatura. Contudo, a variação é reduzida, indicando que o comportamento é essencialmente controlado por iões na fase líquida da argamassa.

Por outro lado, para temperaturas negativas era de esperar que tendesse para um valor constante de resistividade, uma vez que a água intersticial congela e o movimento dos iões passa a ser no estado sólido e não na fase líquida.

A equação de Arrhenius é válida num intervalo de temperaturas que para o caso presente, prevê-se que seja entre 0 °C e 100 °C, enquanto a migração dos iões ocorre no estado líquido.

Para converter o valor da condutividade eléctrica para uma determinada temperatura, pode ser definida a seguinte forma:

$$C_{\text{Ref}} = \beta \cdot C \quad \text{Equação 14}$$

onde,

$$\beta = \frac{\exp\left(\frac{-E}{R \cdot T_{\text{Ref}}}\right)}{\exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right)} \quad \text{Equação 15}$$



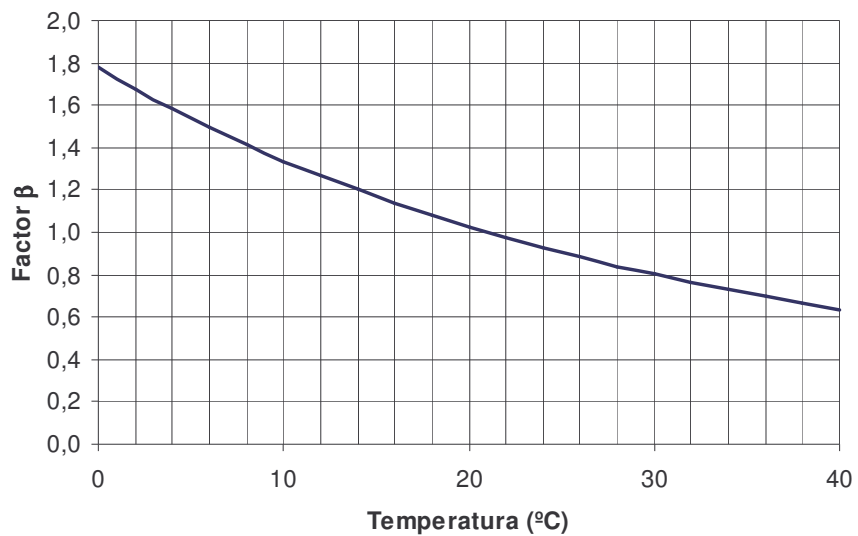


Figura 55 – Relação entre a temperatura e a condutividade eléctrica

Assim, na figura 55 apresenta-se a variação do factor  $\beta$  com a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ , considerando uma temperatura de referência de  $21^{\circ}\text{C}$ . Pode-se verificar que a condutividade obtida a  $40^{\circ}\text{C}$  deve ser multiplicada por 0.62 a fim de obter a condutividade à temperatura de  $21^{\circ}\text{C}$ .

No caso presente, podemos também concluir que a condutividade é essencialmente governada pela migração dos iões na fase líquida e que a contribuição das fibras é reduzida.

## **PREVISÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO BETÃO COM BASE NA SUA RESISTIVIDADE ELÉCTRICA**

---

*capítulo seis*

## 6.1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da evolução da resistência mecânica do betão desde a data de betonagem é de extrema importância. Este conhecimento poderá ter grande impacto na indústria da construção, onde os prazos desempenham um papel fundamental. A possibilidade de poder prever em cada instante a resistência à compressão do betão, permitirá determinar com segurança qual a idade mínima do betão para poderem ser retiradas as cofragens e ser aplicado o pré-esforço, entre outros.

## 6.2 METODOLOGIA UTILIZADA

Foram moldados 18 provetes simples (5x5x5) e 18 provetes com fibra de carbono (5x5x5), conforme indicado em 4.2.3. Em cada molde foi fabricado um provete conforme a figura 43, que possibilitará aferir o valor da resistividade eléctrica. Portanto 3 provetes foram usados para leituras de resistividade e 15 provetes para ensaiar à compressão. Os provetes foram submetidos ao processo de cura descrito em 4.2.3.

A leitura da resistência eléctrica do provete e o cálculo da resistividade foi realizada de forma análoga à representada na figura 47, tratando-se neste caso em concreto de provetes cúbicos 5x5x5cm. Cada valor apresentado na tabela 16 é resultado da média de três ensaios.

## 6.3 RESULTADOS OBTIDOS

### 6.3.1 BETÃO SIMPLES

Tabela 16 – Evolução da resistência mecânica e da resistividade de provetes de betão simples

<i><b>Idade (dias)</b></i>	<i><b>Força (kN)</b></i>	<i><b>Resistência à Compressão (MPa)</b></i>	<i><b>Resistividade (<math>\Omega.cm</math>)</b></i>
1	31,77	12,71	1649,77
2	54,83	21,93	2381,73
3	58,50	23,40	2830,87
4	61,85	24,74	3044,54
7	65,91	26,37	3796,15
14	73,89	29,56	4298,14
28	88,28	35,31	4706,81
56	98,56	39,42	5129,46

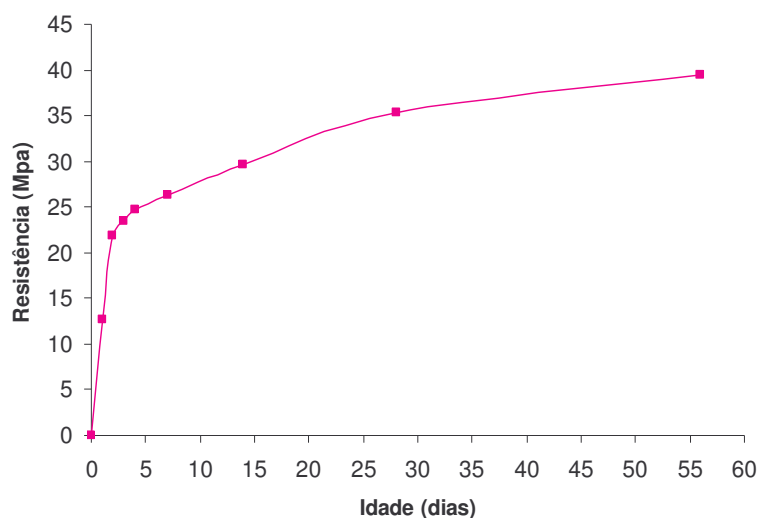


Figura 56 – Variação da resistência mecânica com a idade de provetes de betão simples

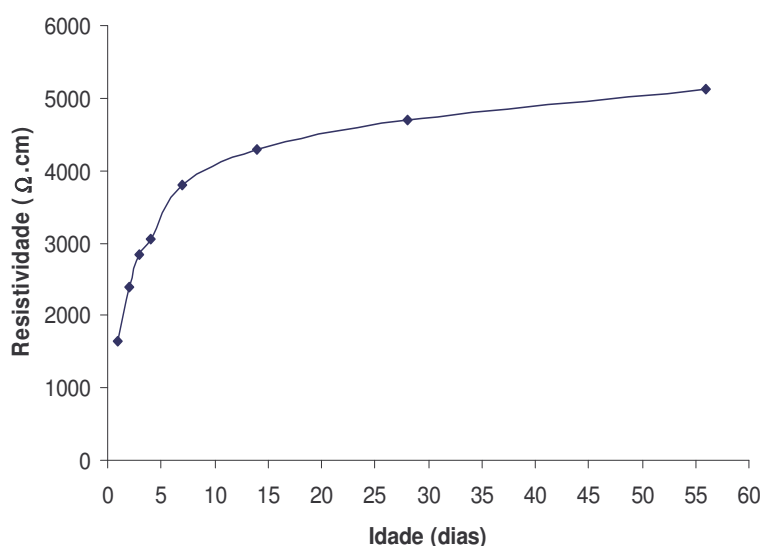


Figura 57 – Variação da resistividade eléctrica com a idade de provetes de betão simples

### 6.3.2 BETÃO COM FIBRAS DE CARBONO (CFRC)

Tabela 17 – Evolução da resistência mecânica e da resistividade de provetes de CFRC

<i>Idade (dias)</i>	<i>Força (kN)</i>	<i>Resistência à Compressão (Mpa)</i>	<i>Resistividade (Ω.cm)</i>
1	28,33	11,33	1937,68
2	54,31	21,72	2799,24
3	55,73	22,29	3327,14
4	62,84	25,14	3578,19
7	64,81	25,92	4460,94
14	71,46	28,58	5049,88
28	87,65	35,06	5535,18
56	98,21	39,28	6028,81

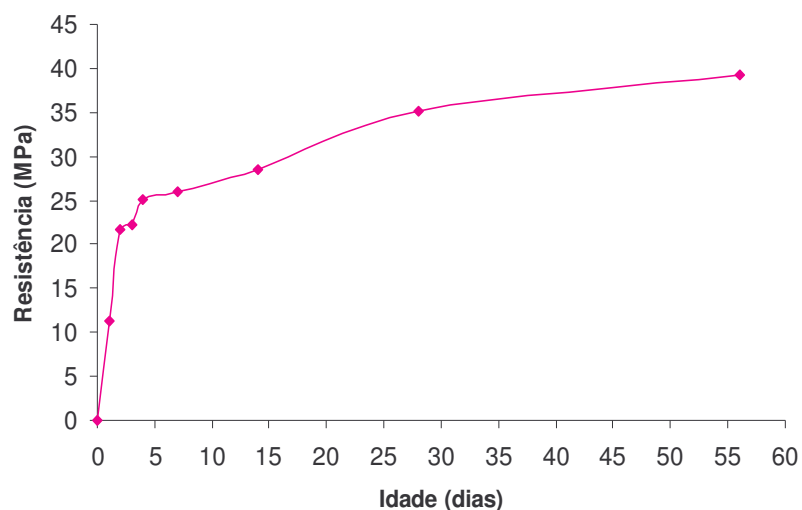


Figura 58 – Variação da resistência mecânica com a idade de provetes de CFRC

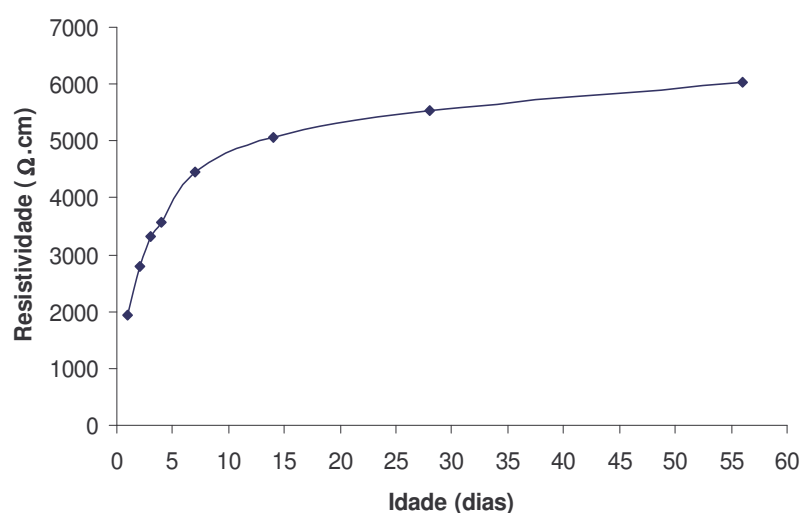


Figura 59 – Variação da resistividade eléctrica com a idade de provetes de CFRC

### 6.3.3 COMPARAÇÃO ENTRE A EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA E RESISTIVIDADE

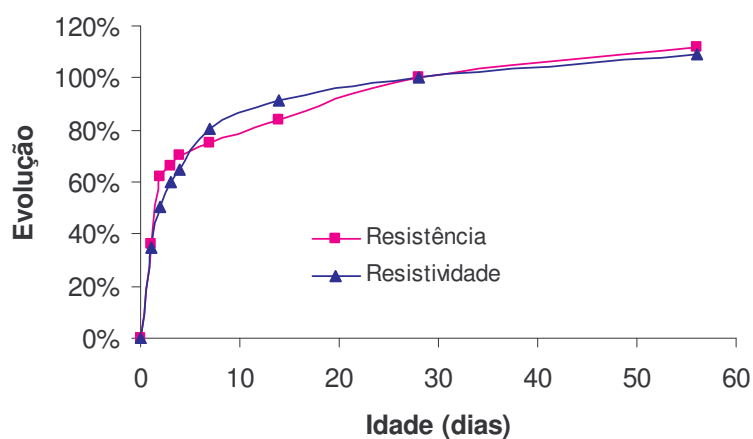


Figura 60 – Evolução da resistência mecânica e da resistividade de provetes de betão simples

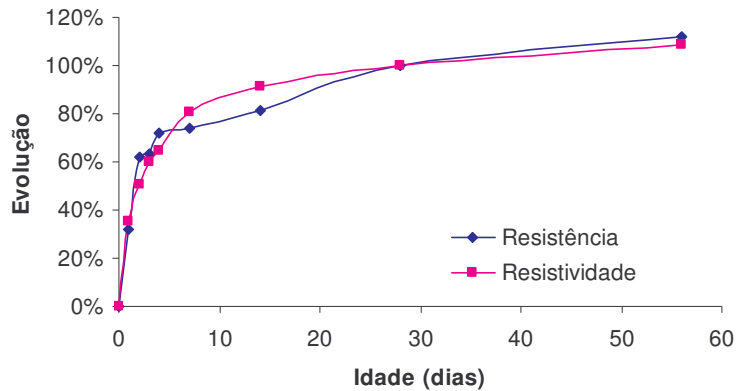


Figura 61 – Evolução da resistência mecânica e da resistividade de provetes de CFRC

## 6.4 ANALISE DE RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos, podemos constatar que a introdução de fibras de carbono não altera o desenvolvimento das resistências mecânicas e da resistividade. Os valores médios da resistência à compressão são sempre inferiores nos provetes com fibra, sendo no entanto a resistividade eléctrica superior nestes também. Tal deve-se à maior porosidade do betão com fibra, devido precisamente à inserção das fibras [60]. A curva que representa a evolução da resistividade eléctrica com a idade tem um comportamento semelhante à que relaciona a resistência à compressão com a idade, como pode ser comprovado através das figuras 60 e 61. Este fenómeno era de esperar, devido à redução do volume de água nos poros da matriz e as alterações ocorridas na microestrutura do betão. Comparando a resistividade eléctrica com a resistência à compressão, obtemos as relações apresentadas nas figuras 62 e 63.

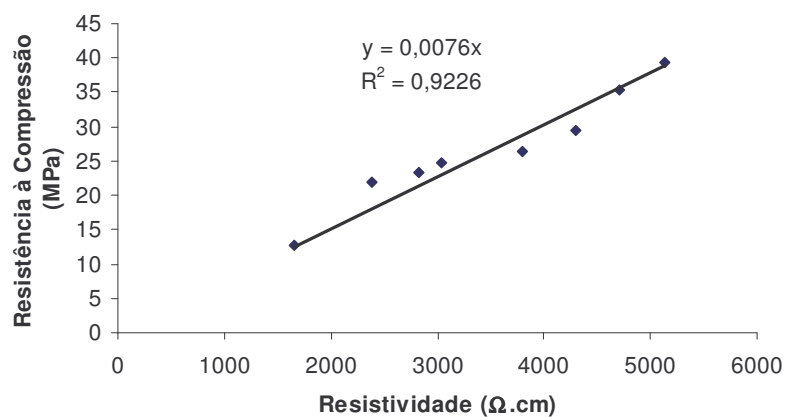


Figura 62 – Correlação entre a resistividade e a resistência à compressão do betão simples

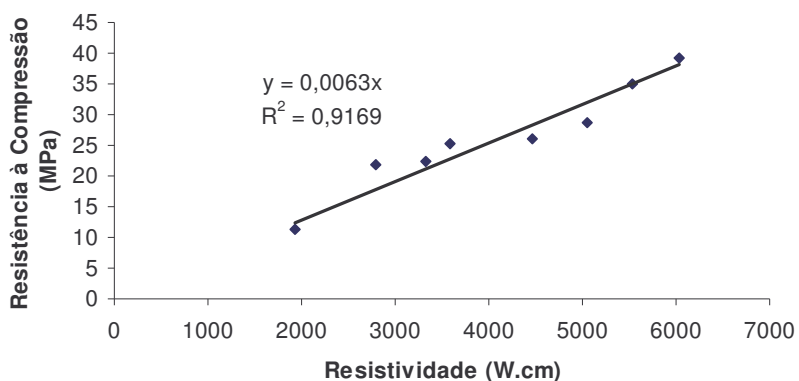


Figura 63 – Correlação entre a resistividade e a resistência à compressão do CFRC

## 6.4.1 MODELOS MATEMÁTICOS

### 6.4.1.1 MÉTODO EMPÍRICO

A previsão da resistência do betão em função da idade é geralmente feita com base em dois métodos: o **método empírico** e o **método teórico**. Devido à semelhança entre as curvas obtidas, pretende-se avaliar a possibilidade de através dos mesmos métodos prever a resistividade eléctrica do betão.

O método empírico resulta na aproximação a uma recta do tipo:

$$\frac{t}{f} = m \cdot t + c$$

Equação 16

em que:

t: idade em dias;

f: resistência à compressão em MPa;

m: declive;

c: ordenada na origem.

Assim, para betão simples (BS) no nosso caso fica:

Tabela 18 – Resistência mecânica – aplicação do método empírico (BS)

<i>Idade (dias)</i>	<i>Resistência à Compressão (MPa)</i>	<i>t/f</i>
1	12,71	0,079
2	21,93	0,091
3	23,40	0,128
4	24,74	0,162

7	26,37	0,266
14	29,56	0,474
28	35,31	0,793
56	39,42	1,420

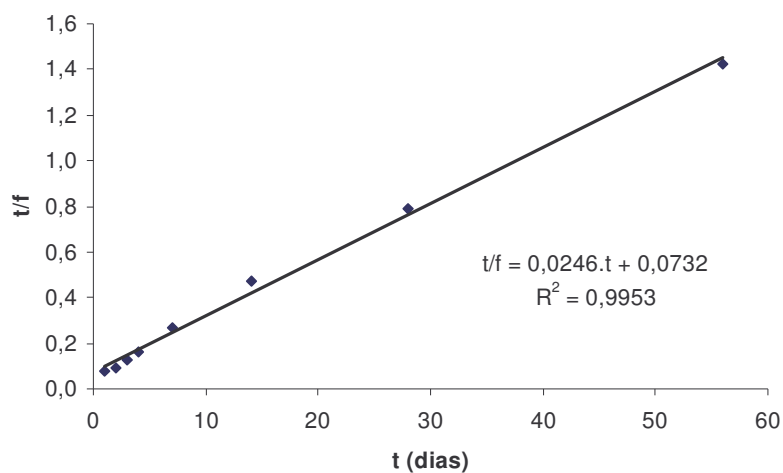


Figura 64 – Previsão da resistência mecânica do betão – método empírico (BS)

Aplicando esta metodologia à evolução da resistividade eléctrica:

Tabela 19 – Aplicação do método empírico à resistividade (BS)

<b>Idade (dias)</b>	<b>Resistividade (<math>\Omega.cm</math>)</b>	<b><math>t/R</math></b>
1	1649,77	0,0006
2	2381,73	0,0008
3	2830,87	0,0011
4	3044,54	0,0013
7	3796,15	0,0018
14	4298,14	0,0033
28	4706,81	0,0059
56	5129,46	0,0109

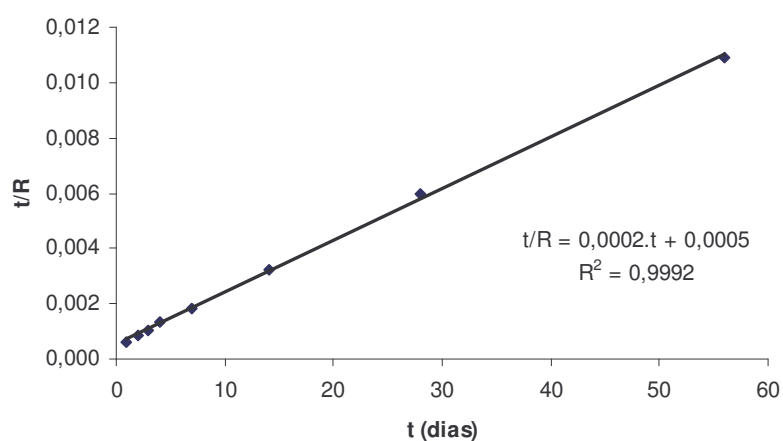


Figura 65 – Previsão da resistividade do betão – método empírico (BS)



Aplicando as regressões, obtém os seguintes valores apresentados na figura 66.

Tabela 20 – Determinação da resistência e da resistividade com base nos modelos empíricos (BS)

<i>Idade (dias)</i>	<i>Resistência à Compressão (MPa)</i>	<i>Resistividade (<math>\Omega.cm</math>)</i>
1	10,23	1396,32
2	16,34	2213,32
3	20,42	2749,58
4	23,32	3128,60
7	28,54	3802,52
14	33,55	4440,14
28	36,77	4846,48
56	38,63	5078,87

Relacionando estes valores, obtemos a seguinte aproximação:

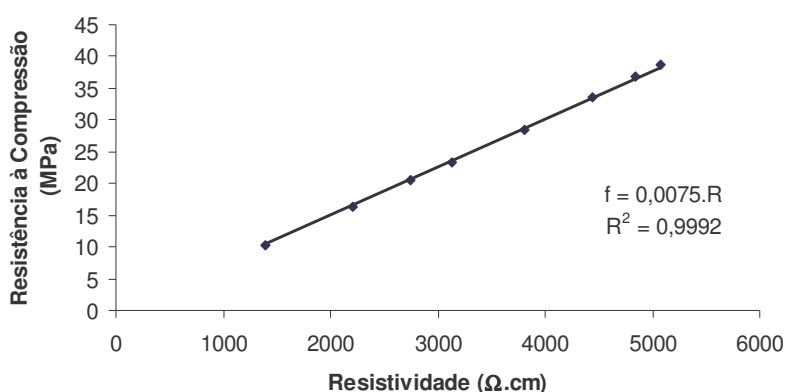


Figura 66 – Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à compressão para betão simples baseada no método empírico

Aplicando esta mesma metodologia para o betão com fibras de carbono (CFRC), fica:

Tabela 21 – Resistência mecânica – aplicação do método empírico (CFRC)

<i>Idade (dias)</i>	<i>Resistência à Compressão (MPa)</i>	<i>t/f</i>
1	11,33	0,088
2	21,72	0,092
3	22,29	0,135
4	25,14	0,159
7	25,92	0,270
14	28,58	0,490
28	35,06	0,799
56	39,28	1,426

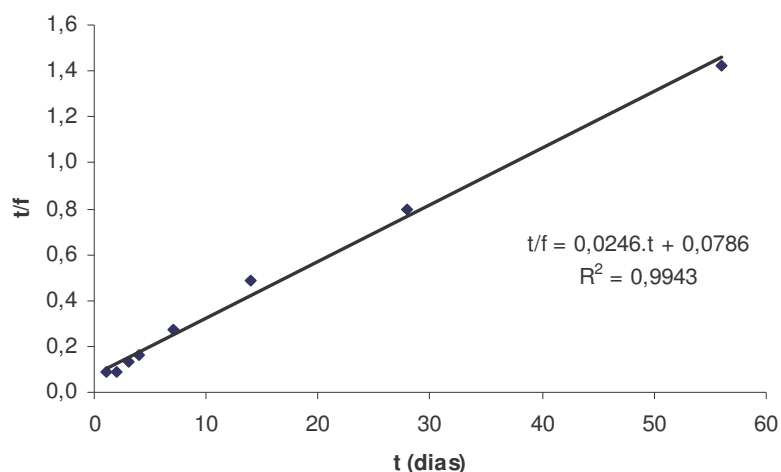


Figura 67 – Previsão da resistência mecânica do betão – método empírico (CFRC)

Aplicando esta metodologia à evolução da resistividade eléctrica:

Tabela 22 – Aplicação do método empírico à resistividade (CFRC)

<b>Idade (dias)</b>	<b>Resistividade (<math>\Omega.cm</math>)</b>	<b>t/R</b>
1	1937,68	0,0005
2	2799,24	0,0007
3	3327,14	0,0009
4	3578,19	0,0011
7	4460,94	0,0016
14	5049,88	0,0028
28	5535,18	0,0051
56	6028,81	0,0093

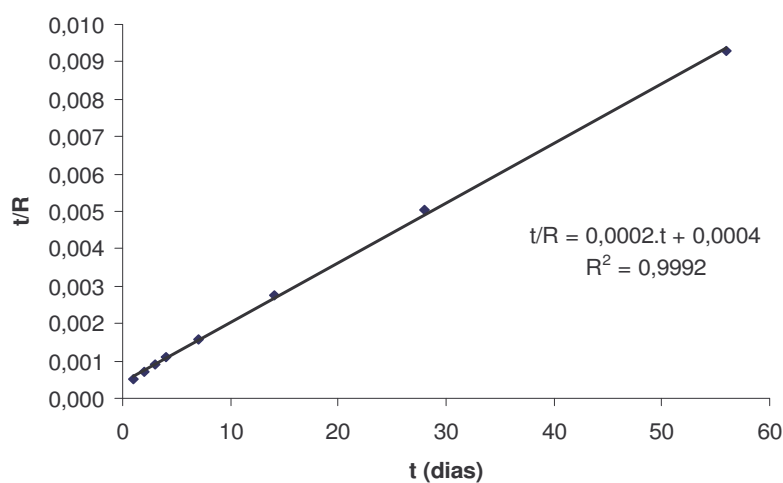


Figura 68 – Previsão da resistividade do betão – método empírico (CFRC)

Aplicando as regressões, obtém os valores apresentados na tabela 23 e na figura 69.

Tabela 23 – Determinação da resistência e da resistividade com base nos modelos empíricos (CFRC)

<i>Idade (dias)</i>	<i>Resistência à Compressão (MPa)</i>	<i>Resistividade (Ω.cm)</i>
1	9,69	1640,85
2	15,65	2601,07
3	19,69	3231,42
4	22,60	3676,96
7	27,91	4469,22
14	33,10	5218,89
28	36,49	5696,66
56	38,46	5969,93

Relacionando estes valores, obtemos a seguinte aproximação:

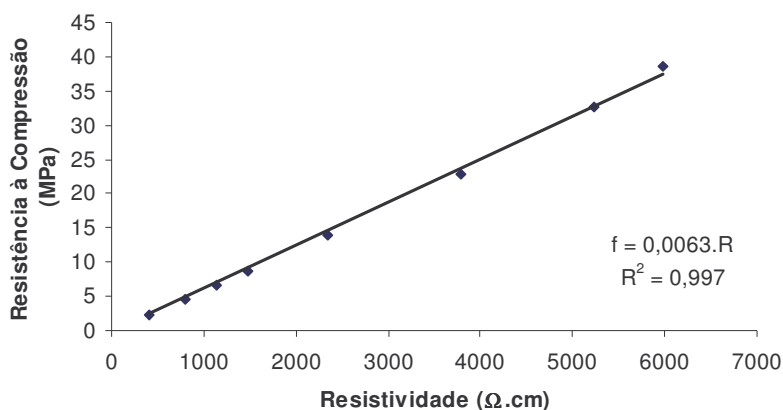


Figura 69 – Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à compressão para CFRC baseada no método empírico

#### 6.4.1.2 MÉTODO TEÓRICO

Por sua vez, o **método teórico** resulta da aplicação da expressão proposta por Jalali:

$$f = f_{\max} \cdot (1 - e^{-kt})^n \quad \text{Equação 17}$$

em que:

$f$ : resistência à compressão em MPa para a idade  $t$ ;

$f_{\max}$ : resistência máxima à compressão;

$t$ : idade em dias;

$n$ : parâmetro que descreve a morfologia do material cimentício;

$k$ : parâmetro que define a velocidade de formação do material cimentício.

Para determinar os valores de  $f_{\max}$ ,  $k$  e  $n$ , utilizou-se um programa de cálculo automático para regressões não lineares.

Para o caso de betão simples, para a resistência à compressão, obtiveram-se os valores apresentados na tabela 24.

Tabela 24 – Resistência mecânica – aplicação do método teórico (BS)

$f_{\max}$	44,0938 MPa
$k$	0.4488
$n$	0.3859
$R^2$	0.9748

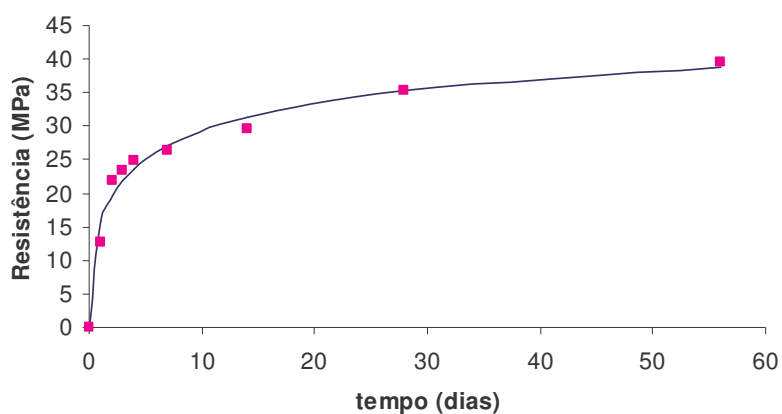


Figura 70 – Previsão da resistência mecânica do betão – modelo teórico (BS)

Aplicando a mesma metodologia para a resistividade eléctrica, obtiveram-se os valores apresentados na tabela 25.

Tabela 25 – Resistividade – aplicação do modelo teórico (BS)

$R_{\max}$	5114.5718 $\Omega$ .cm
$k$	0.4139
$n$	0.5789
$R^2$	0.9977

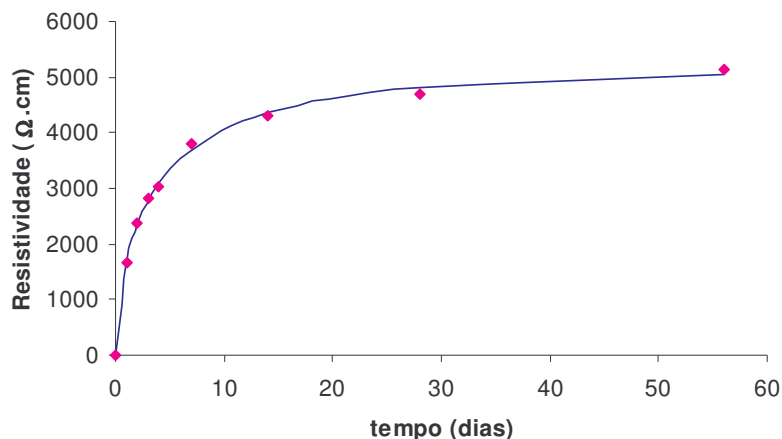


Figura 71 – Previsão da resistividade do betão – modelo teórico (BS)

Assim, obteve-se as seguintes expressões:

Para a resistência à compressão:

$$f_{\max} = 44.0938 \cdot \left(1 - e^{-0.4488 \cdot t^{0.3859}}\right)$$

Para a resistividade:

$$R_{\max} = 5114.5718 \cdot \left(1 - e^{-0.4139 \cdot t^{0.5789}}\right)$$

Aplicando estas expressões, obtemos os valores apresentados na tabela 26 e na figura 72.

Tabela 26 – Determinação da resistência e da resistividade com base nos modelos teóricos (BS)

<i>Idade (dias)</i>	<i>Resistência à Compressão (MPa)</i>	<i>Resistividade (Ω.cm)</i>
1	15,94	1733,50
2	19,56	2358,39
3	21,88	2774,26
4	23,60	3083,40
7	27,06	3687,97
14	31,37	4355,06
28	35,40	4818,35
56	38,81	5042,00

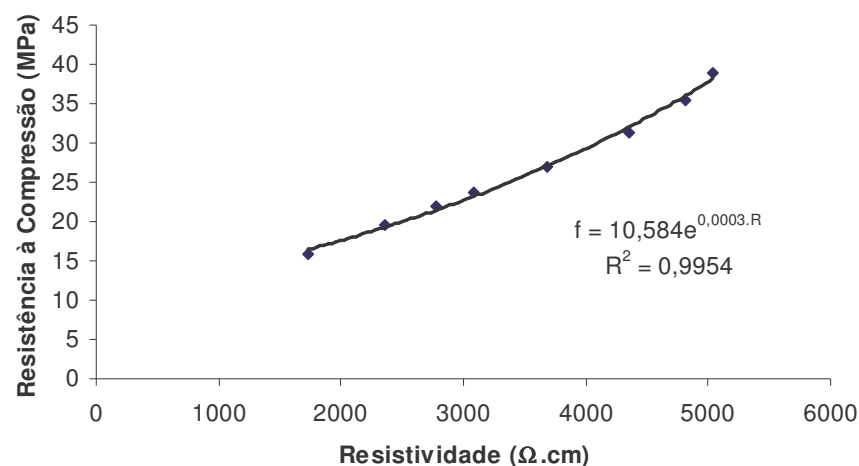


Figura 72 – Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à compressão para betão simples – modelo teórico

Para o caso do betão com fibras de carbono (CFRC), e aplicando a mesma metodologia, obteve-se os valores indicados da tabela 27.

Tabela 27 – Resistência mecânica – aplicação do modelo teórico (CFRC)

$f_{\max}$	43.3761 MPa
k	0.4320
n	0.4037
$R^2$	0.9647

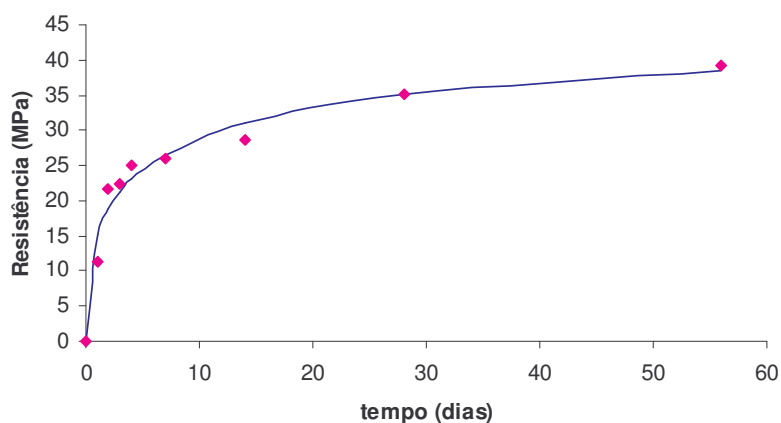


Figura 73 – Previsão da resistência mecânica do betão – modelo teórico (CFRC)

Aplicando a mesma metodologia para a resistividade eléctrica, obtiveram-se os valores apresentados na tabela 28.

Tabela 28 – Resistividade – aplicação do modelo teórico (CFRC)

$R_{\max}$	6012.69 $\Omega \cdot \text{cm}$
k	0.4137
n	0.5789
$R^2$	0.9989

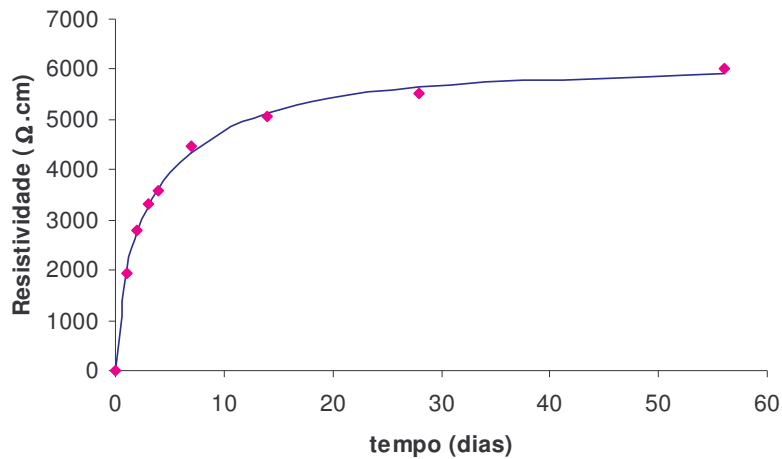


Figura 74 – Previsão da resistividade do betão – modelo teórico (CFRC)

Assim, obtiveram-se as seguintes expressões:

Para a resistência à compressão:

$$f = 43.3761 \cdot (1 - e^{-0.4320 \cdot t^{0.4037}})$$

Para a resistividade:

$$R = 6012.69 \cdot (1 - e^{-0.4137 \cdot t^{0.5789}})$$

Aplicando estas expressões, obtemos os valores indicados na tabela 29 e na figura 75.

Tabela 29 – Determinação da resistência e da resistividade com base nos modelos teóricos (CFRC)

<b>Idade (dias)</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>Resistividade (<math>\Omega \cdot \text{cm}</math>)</b>
1	15,22	2037,10
2	18,88	2771,55
3	21,25	3260,38
4	23,01	3623,78
7	26,56	4334,54
14	30,99	5118,98
28	35,12	5663,98
56	38,54	5927,19

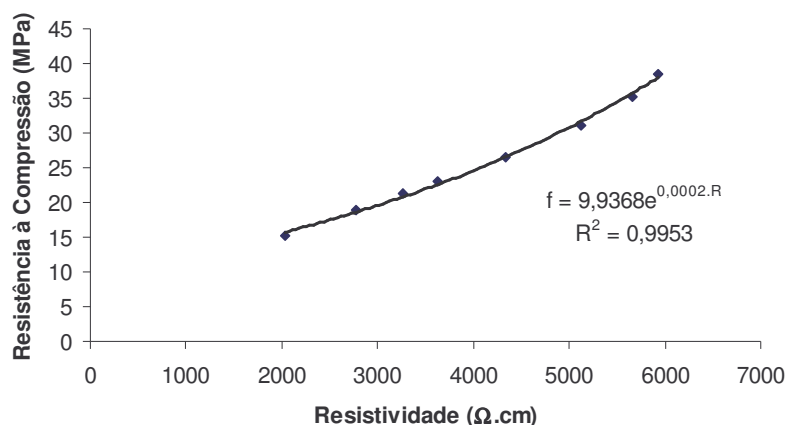


Figura 75 – Relação entre a resistividade eléctrica e a resistência à compressão para betão com fibras – modelo teórico

Comparando os valores medidos com os valores calculados a partir das expressões determinadas anteriormente, obtém-se os seguintes resultados apresentados nas figuras 76, 77, 78 e 79.

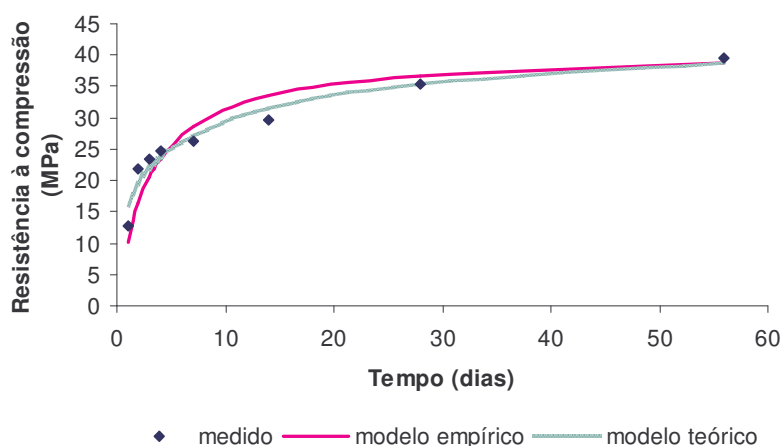


Figura 76 – Valores de resistência à compressão medidos e calculados – BS

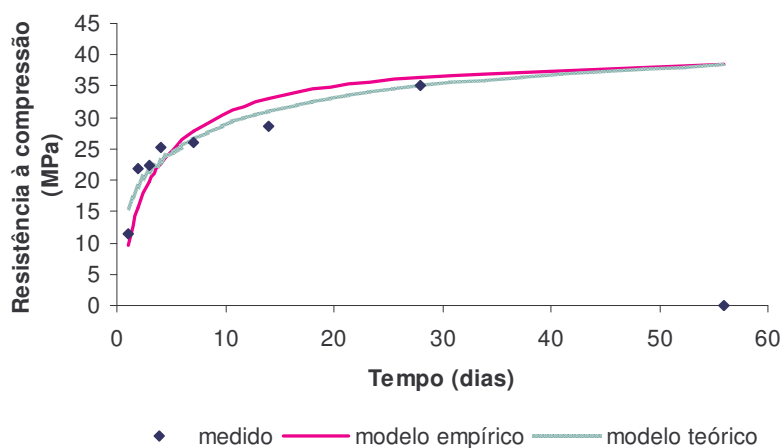




Figura 77 – Valores de resistência à compressão medidos e calculados – CFRC

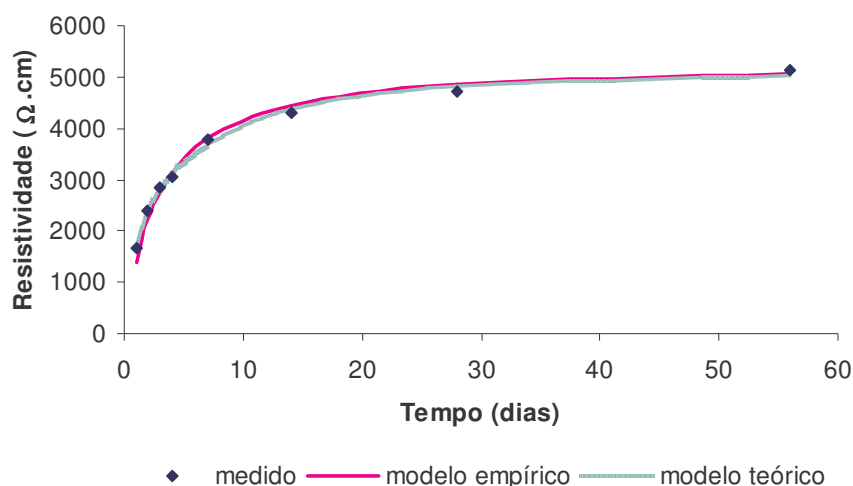


Figura 78 – Valores de resistividade medidos e calculados – BS

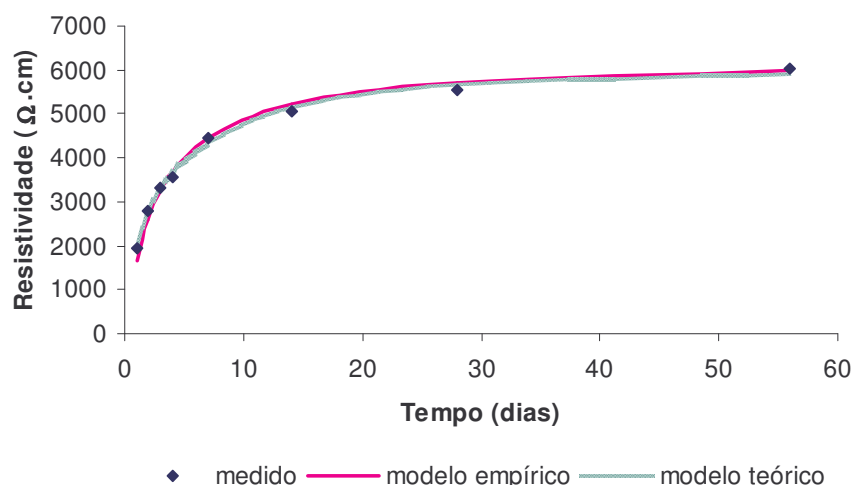


Figura 79 – Valores de resistividade medidos e calculados – CFRC

## 6.5 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO BETÃO AOS 28 DIAS COM BASE NOS VALORES DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA INICIAIS

Pelo facto de se tratar de um ensaio não destrutivo, seria extremamente útil se a partir dos valores de resistividade eléctrica do betão para idades iniciais fosse possível estimar a resistência à compressão do betão aos 28 dias de idade.

Recorrendo ao método empírico (equação 16), e tendo por base a relação apresentada na figura 66, aplicando a metodologia descrita em 6.4.1.1 para as leituras

de resistividade efectuadas até aos 7 dias de idade em betão simples (tabela 16) obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{t}{R} = 2,06242E - 4 \cdot t + 4,3146E - 4$$

Substituindo  $t$  para a idade de 28 dias, obtém-se a resistividade ( $R$ ) de 4511  $\Omega \cdot \text{cm}$ .

Utilizando a relação apresentada na figura 66, estima-se o seguinte valor para a resistência à compressão aos 28 dias:

$$f_{28} = 0.0075 \cdot 4511 \Leftrightarrow f_{28} = 33,8 \text{ MPa}$$

O valor da resistência à compressão obtido no ensaio destrutivo foi de 35.3 MPa conforme apresentado na tabela 16, o que dá um erro de 4%.

Caso se utilize apenas as leituras de resistividade até a idade de 4 dias, e aplicando a mesma metodologia, obtém se uma resistividade de 4041  $\Omega \cdot \text{cm}$  e um valor de resistência à compressão aos 28 dias de 30,3 MPa, o que dá um erro de 14% conforme podemos constatar com base na figura 80.

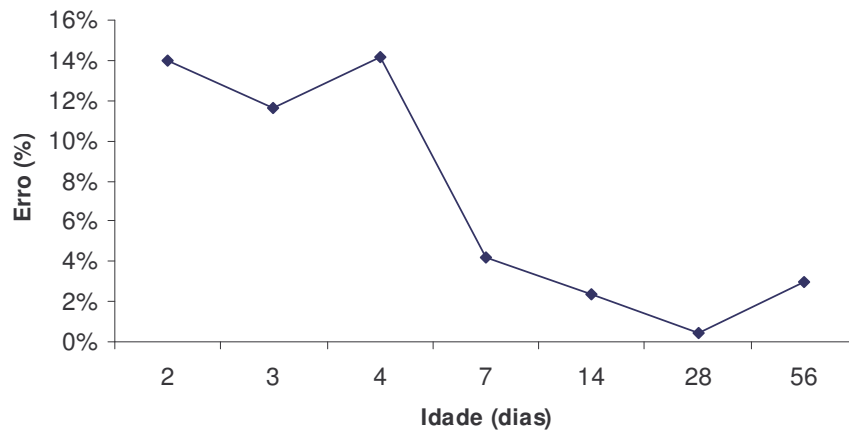


Figura 80 – variação do erro na previsão da resistência mecânica aos 28 dias com base nas idades utilizadas na medição da resistividade – utilização do método empírico (BS)

A aplicação do método teórico (equação 17) é baseada no valor da resistividade máximo, sendo esta a assíntota horizontal da função. Neste caso, a aplicação deste método não permitirá estimar a resistência à compressão do betão com base nas leituras iniciais de resistividade, pois estas estarão limitadas ao valor da assíntota ( $R_{\text{max}}$ ) definido com base nas leituras utilizadas.

## 6.6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos podemos concluir que é possível prever com boa aproximação a resistência à compressão do betão com base no valor da sua resistividade eléctrica, desde que as leituras sejam previamente calibrado com base em ensaios laboratoriais efectuados sobre o material.

Não havendo curvas de calibração, a leitura de resistividade em tempos iniciais pode ser utilizada para determinar a curva provável de resistividade com o tempo. Assim, o betão terá a resistência pretendida desde que atinja uma resistividade desejada.

A aplicação de modelos matemáticos empíricos e teóricos permitiu concluir que é possível traduzir a evolução da resistividade eléctrica com base nas expressões utilizadas para aferir a evolução da resistência mecânica, e assim prever o valor da resistividade para qualquer idade.

A aplicação destes modelos permitiu igualmente relacionar com grande aproximação o valor da resistividade eléctrica com a resistência à compressão do betão simples e reforçado com fibra de carbono, calculado com base no método empírico ou teórico.

A partir das relações estabelecidas entre a resistividade e a resistência à compressão utilizando o método empírico, é possível estimar com grande aproximação a resistência à compressão do betão aos 28 dias de idade com base nas leituras de resistividade eléctrica efectuadas até aos 7 dias.

Não foram encontradas diferenças significativas entre os provetes de betão simples e betão reforçado com fibras de carbono, podendo concluir não haver benefícios aparentes em incluir fibras de carbono no betão, para o fim aqui descrito.

## **Previsão da Presença de Cloretos no Betão com Base no Valor da Resistividade Eléctrica**

---

*Capítulo sete*

## 7.1 INTRODUÇÃO

É de conhecimento geral que a corrosão das armaduras de aço no betão armado e pré-esforçado é facilmente induzido pela presença de iões de cloro. O teor de cloretos do betão não deve exceder um certo valor que é especificado nas normas nacionais. A NP ENV 206 indica os seguintes valores [48]:

Tabela 30 – Teor máximo de cloretos do betão segundo a NP ENV 206 [48]

<b>Betão</b>	<b>Cl<sup>-</sup> por massa de cimento</b>
Betão simples	1%
Betão armado	0.4%
Betão Pré-esforçado	0.2%

Seria de extrema utilidade aferir o grau de contaminação do betão de forma simples, rápida, económica e não destrutiva.

Com base nestes pressupostos, levou-se a efeito uma campanha de ensaios com o objectivo de averiguar a relação entre a concentração de cloretos em betão simples e betão com fibra, e com base no valor da sua resistividade eléctrica.

## 7.2 METODOLOGIA UTILIZADA

Foram moldados 15 provetes cúbicos (5x5x5) de betão simples e igualmente 15 de betão com fibras, conforme indicado em 4.2.3 e com as composições indicadas na tabela 13.

Em cada 3 conjuntos de provetes foi adicionado sal (NaCl) à água da amassadura nas quantidades necessárias de forma a obter as seguintes percentagens de Cl<sup>-</sup> por massa de cimento indicados na tabela 31.

Tabela 31 – Dosagens de NaCl utilizadas

<b>% de Cl<sup>-</sup> por massa de cimento</b>	<b>Massa de NaCl (g)</b>
0,0%	0,0
0,1%	0,29
0,2%	0,58
0,4 %	1,16
0,6 %	1,74

Depois de moldados, os provetes foram curados conforme descrito em 4.2.3.

Foram realizadas leituras de resistividade eléctrica aos 2, 7, 14 e 28 dias, seguindo a metodologia descrita em 5.3.1.2 Foram igualmente moldados provetes cilíndricos de betão simples e com fibras, com um diâmetro de aproximadamente 100 mm e uma altura de 300 mm, para utilizar no ensaio *CTH Rapid Method*.

## 7.3 RESULTADOS OBTIDOS

### 7.3.1 ENSAIOS EM PROVETES CÚBICOS

#### 7.3.1.1 BETÃO SIMPLES

Tabela 32 – Valores de resistividade em provetes de betão simples com vários teores de cloretos

Teor em Cl (%)	Resistividade ( $\Omega.cm$ )				
	2 dias	7 dias	10 dias	14 dias	28 dias
0,0	2333,00	3703,17	3930,73	4566,33	5238,50
0,1	2336,96	3653,71	3968,34	4475,16	5084,89
0,2	2398,43	3611,77	3934,94	4387,14	5004,03
0,4	1990,31	3348,34	3723,01	4285,10	4996,25
0,6	2230,93	3542,68	3852,49	4436,99	5130,69

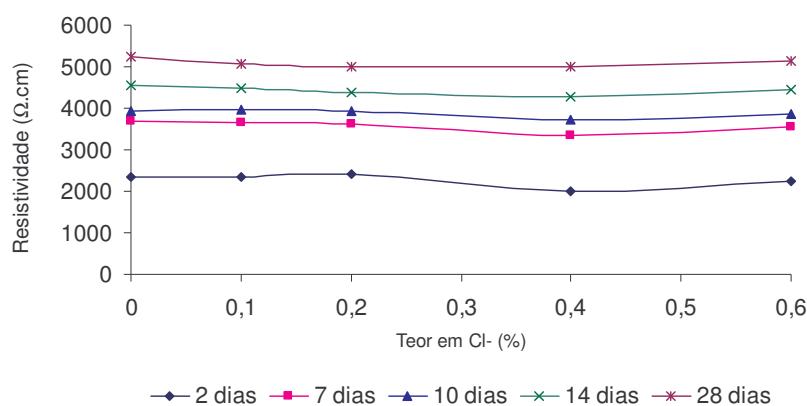


Figura 81 – Variação da resistividade com a idade e com o teor em Cloretos em provetes de betão simples

#### 7.3.1.2 BETÃO COM FIBRAS DE CARBONO (CFRC)

Tabela 33 – Valores de resistividade em provetes de betão com fibras com vários teores de cloretos

Teor em Cl (%)	Resistividade ( $\Omega.cm$ )				
	2 dias	7 dias	10 dias	14 dias	28 dias
0	2200,22	3355,70	3565,72	4291,85	4566,21
0,1	2119,39	3314,43	3701,42	4059,60	4573,17
0,2	2176,28	3269,75	3859,25	3973,51	4538,58
0,4	1921,36	3036,44	3510,83	3731,34	4460,97
0,6	2070,39	3210,27	3494,75	3985,21	4562,74

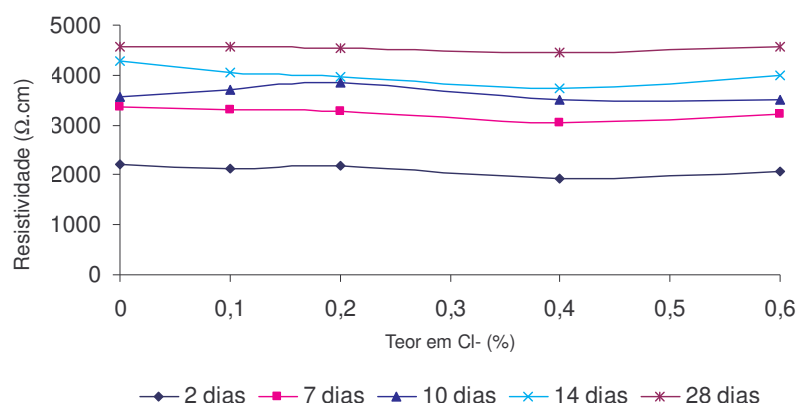


Figura 82 – Variação da resistividade com a idade e com o teor em Cloretos em provetes de betão com fibra

### 7.3.1.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

Adicionando cloreto de sódio (NaCl) à água da amassadura, é possível verificar a diminuição da resistividade eléctrica à medida que aumenta a concentração de NaCl, para todas as idades ensaiadas. No entanto, a diminuição da resistividade é pequena, de modo que para os valores de concentração de NaCl utilizados, não é possível estabelecer uma relação com aplicação prática.

### 7.3.2 ENSAIOS EM PROVETES CILÍNDRICOS

Foram realizados ensaios *CTH Rapid Method*, em provetes simples e em provetes com fibra de carbono. O objectivo destes ensaios era avaliar a variação da resistividade eléctrica do material à medida que a concentração dos cloretos aumenta.



Figura 83 – Ensaio *CTH Rapid Method*

No entanto, devido à duração do ensaio e ao valor da d.d.p. aplicado, é sabido que a temperatura do provete aumenta ao longo do ensaio. Tal deve-se à resistividade do material, que se manifesta através da libertação de calor. Como já foi analisado no capítulo 5, o aumento da temperatura tem implicações no valor da resistividade

eléctrica. Por isso, além de controlar a evolução da resistividade ao longo do ensaio, acompanhou-se igualmente a evolução da temperatura. Apresenta-se de seguida os resultados obtidos sobre provetes de betão simples e provetes de betão com fibra de carbono.

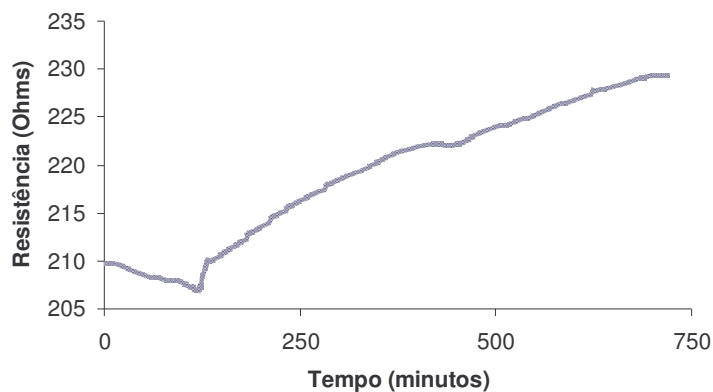


Figura 84 – Evolução da resistência eléctrica durante o ensaio CTH – Betão Simples

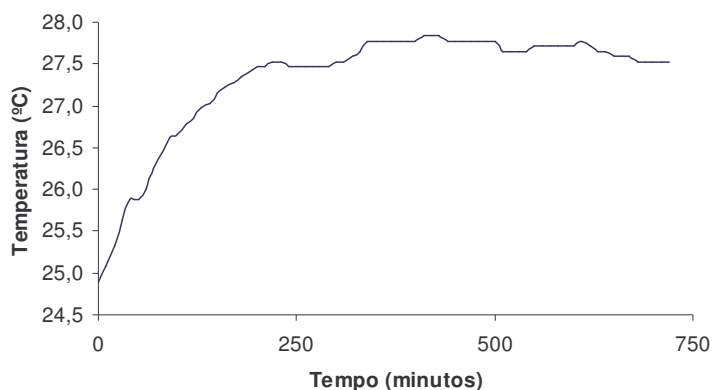


Figura 85 – Evolução da temperatura do provete durante o ensaio CTH – Betão Simples

Calculando as variações relativas destas grandezas, podemos compara-las mais facilmente:

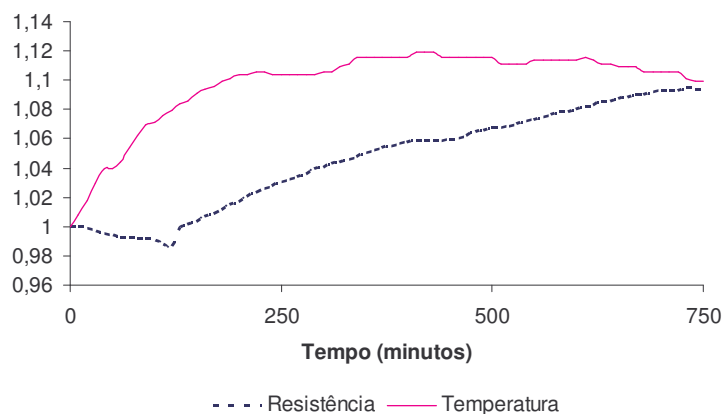


Figura 86 – Variação relativa da Resistência e da Temperatura durante o Ensaio CTH – Betão simples



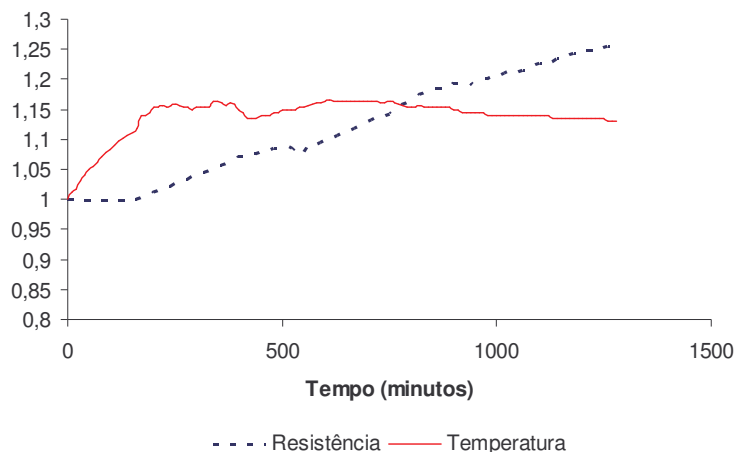


Figura 87 – Variação relativa da Resistência e da Temperatura durante o Ensaio CTH – CFRC

De forma a eliminar o efeito da temperatura, estimou-se o valor da resistência eléctrica para uma temperatura de referência de 21°C. Para tal, recorreu-se ao factor  $\beta$ , cuja variação está indicada na figura 55, considerando uma Energia de Activação igual a 18133,29 J/mol.

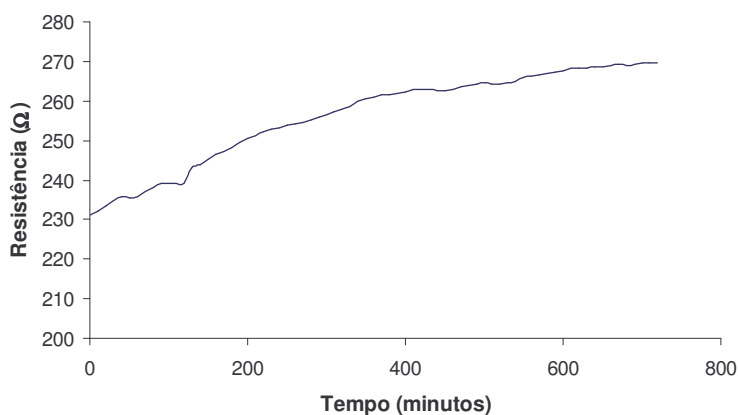


Figura 88 – Evolução da resistência eléctrica durante o ensaio CTH para uma temperatura constante igual a 21°C – betão simples

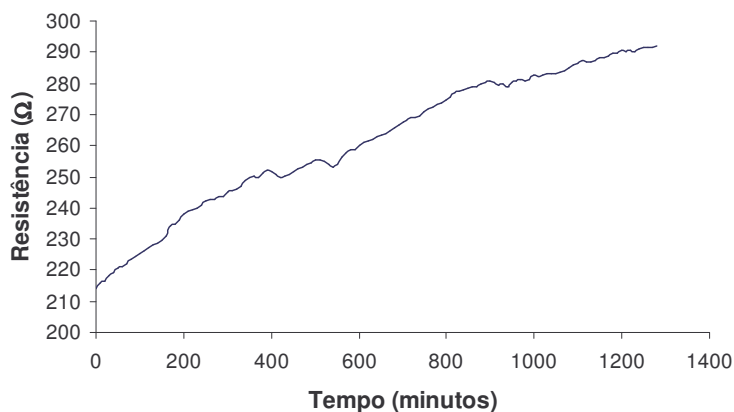


Figura 89 – Evolução da resistência eléctrica durante o ensaio CTH para uma temperatura constante igual a 21°C – CFRC

### 7.3.2.1 ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que a resistência eléctrica aumenta com o decorrer do ensaio CTH, assim como a temperatura do provete. Este resultado ocorreu em betão simples e em betão reforçado com fibras de carbono.

## 7.4 CONCLUSÃO

Na primeira campanha de ensaios realizada, onde se adicionou cloreto de sódio (NaCl) à água de amassadura, foi possível verificar uma pequena diminuição da resistividade eléctrica à medida que a concentração de NaCl aumenta. No entanto, sabendo que a resistividade eléctrica é um parâmetro também dependente de outras variáveis, para os valores de concentração de NaCl utilizado, não parece ter aplicação prática.

Relativamente aos ensaios CTH – *Rapid Method*, conclui-se que a resistência eléctrica do betão aumenta com o decorrer do ensaio, assim como a temperatura do provete. De forma a eliminar o efeito induzido pelo aumento da temperatura, estimou-se com base na figura 55, a resistência eléctrica para uma temperatura padrão de 21°C, verificando-se claramente o aumento da resistência eléctrica do provete durante a realização do ensaio. Poder-se-á explicar o aumento da resistência eléctrica devido à formação de bolhas de ar à superfície do provete, junto aos eléctrodos, durante o ensaio. Estas bolhas de ar vão-se formando ao longo do ensaio, isolando o provete, originando o aumento da resistividade.

O aumento da temperatura do provete durante o decorrer do ensaio CTH – *Rapid Method*, deturpa o valor da resistividade eléctrica do betão. Analisando a figura 84 é possível concluir que nas duas primeiras horas após o início do ensaio, a resistividade eléctrica do provete diminui. No entanto, com base nos registos de temperatura e corrigindo o valor da resistividade eléctrica para uma temperatura constante conforme indicado na figura 55, podemos concluir que na realidade, naquele período de tempo, a resistência eléctrica do provete aumentou (figura 88). Tal significa que na utilização deste tipo de ensaios para aferir a qualidade de um betão, nomeadamente a norma da série ASTM *Standard C 1202 – 94: “Electrical Indication of Concrete Ability to Resist Chloride Ion Penetration”* [5] dever-se-á sempre ter em consideração o efeito da temperatura do provete sobre as suas propriedades eléctricas.

Contudo, dever-se-á assegurar que não ocorra a permanência de bolhas de gás junto aos eléctrodos, o que podem mascarar os resultados. No presente trabalho os resultados foram afectados por este fenómeno, não podendo retirar a informação pretendida.

**Polímero Reforçado com Fibras de Carbono Para Medir  
Assentamentos de Fundações**

---

*capítulo oito*

## 8.1 INTRODUÇÃO

A grande maioria das patologias e acidentes em estruturas ocorrem devido a problemas de fundações. Parte destes problemas terá origem em erros de concepção de projectos, mas a maior parcela tem como fonte o incorrecto ou inexistente conhecimento do terreno, a errada escolha do método construtivo para as fundações ou a defeituosa execução.

A observação e monitorização do comportamento das fundações de uma estrutura tem por objectivo a comparação do comportamento real da obra com as previsões feitas durante o projecto. Quando necessário, permitirá a correcção de eventuais anomalias atempadamente.

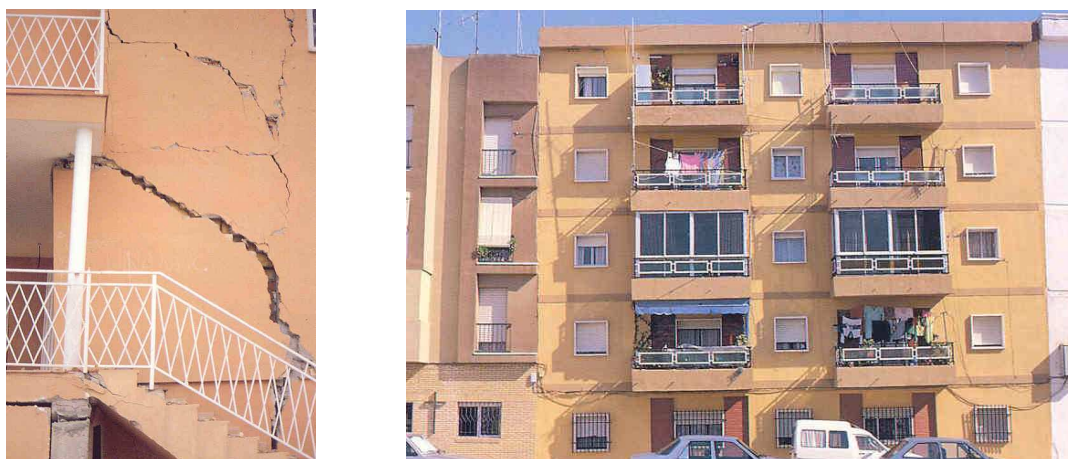


Figura 90 – Exemplo de anomalias em edifícios devido a problemas de assentamentos excessivos

Geralmente, apenas em obras de grande importância (barragens, edifícios muito altos, grandes aterros, etc.) recorre-se à monitorização dos assentamentos. Este facto deve-se em parte ao elevado custo associado à monitorização de estruturas, assim como as dificuldades inerentes à sua implementação.

Pretende-se estudar o comportamento eléctrico de um polímero com a inclusão de fibras de carbono. O material seria assim composto basicamente por duas fases: uma polimérica, inerte e elástica, e outra fase constituída pelas fibras de carbono dispersos no interior do polímero, formando a fase condutora.

Considerando que cada fibra forma um pequeno troço condutor, conforme o estado de tensão/deformação do polímero as fibras estariam mais próximas ou mais afastadas, aumentando ou diminuindo respectivamente a condutividade eléctrica do material.

Esta característica possibilitaria a utilização deste material como um sensor de custo muito reduzido para medir deformações, bastando para tal acompanhar a variação da sua resistência/conductividade eléctrica.

## 8.2 CONSTRUÇÃO DO SENSOR

O sensor é constituído pelo polímero indicado em 4.1.6, com a dosagem 10:1 (base:catalizador). A dosagem de fibra de carbono foi de 10% do peso do polímero. Para dar maior consistência ao sensor, assim como para assegurar o perfeito atrito lateral com o solo, este foi moldado dentro de um tubo de PEAD corrugado, utilizado geralmente para cabos de telecomunicações, com o diâmetro interior de 75mm (figura 91).



Figura 91 – Sensor em polímero com fibras de carbono para medir assentamentos

Nos topos inferior e superior do sensor, a cerca de 5mm da superfície foi colocada uma rede metálica com a respectiva ligação para o exterior através de fio condutor. Será nestes fios que será lida a resistência eléctrica do sensor.

## 8.3 DESEMPENHO DO SENSOR

Para aferir o desempenho do sensor quanto à variação da resistividade eléctrica conforme o seu estado de deformação, foram realizados alguns ensaios que consistiram em aplicar carga ao sensor e medir a resistência eléctrica. Nestes ensaios não foram medidos valores de força e deformação, apenas se pretendia verificar se havia variação da resistência eléctrica do sensor quando se lhe aplica uma

determinada tensão. O multímetro utilizado (figura 92) foi programado para realizar leituras de 2 em 2 segundos.



Figura 92 - Ensaios de carga / descarga ao sensor para aferir o seu desempenho e multímetro utilizado

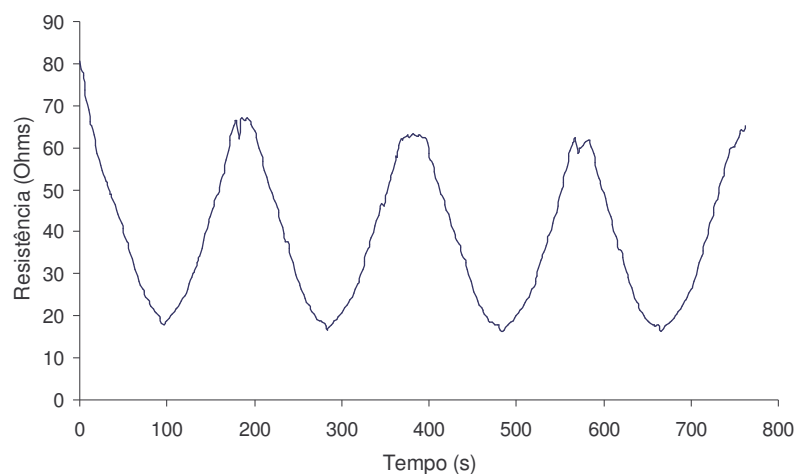


Figura 93 – Ensaio carga / descarga sobre o sensor

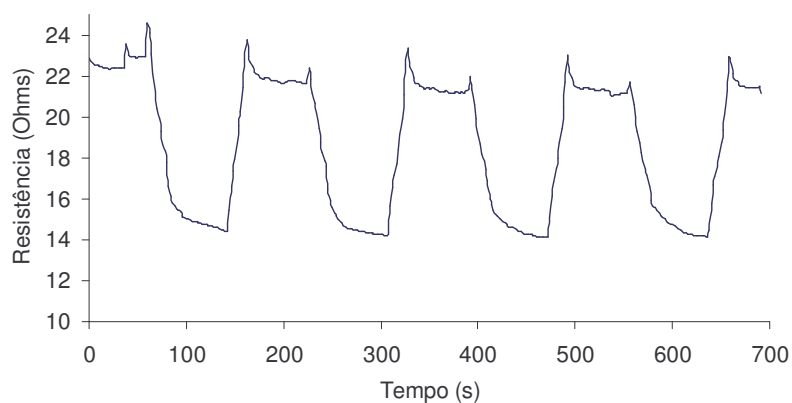


Figura 94 – Ensaio carga / descarga com patamar sobre o sensor

Após a realização destes ensaios ficou bem clara a apetência deste material para funcionar como sensor de assentamentos.

## 8.4 CALIBRAÇÃO DO SENSOR

De seguida, realizaram-se alguns ensaios com vista a obter uma curva de calibração “resistência eléctrica vs deformação” do sensor.

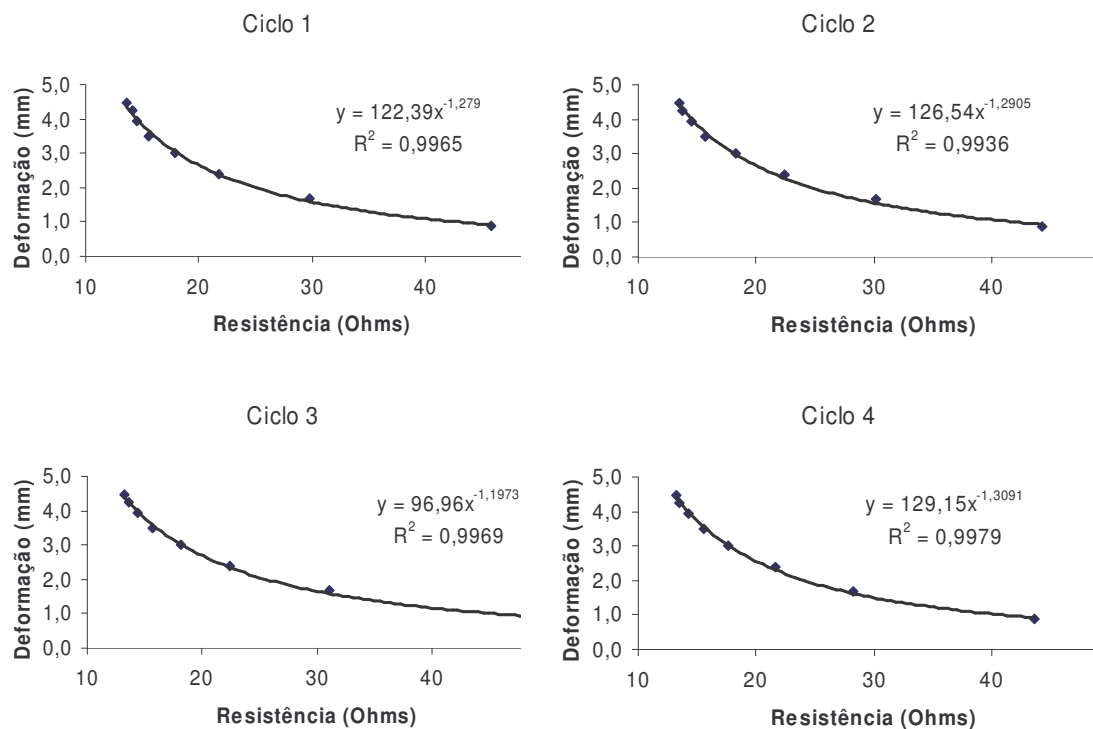


Figura 95 – Ciclo de carga para calibrar o sensor

Juntando todos os valores resulta a seguinte relação:

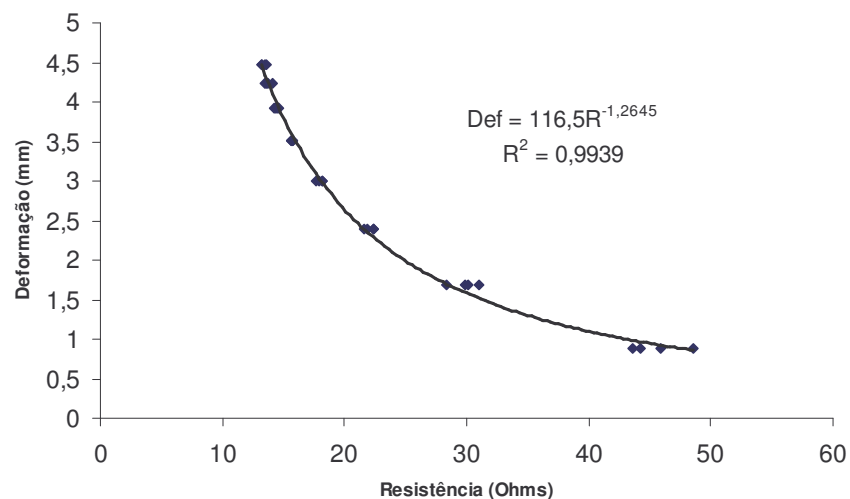


Figura 96 – relação entre a resistência eléctrica do sensor e a sua deformação



## 8.5 AVALIAÇÃO DO SENSOR EM SOLO

De forma a simular as condições de carregamento de um solo, foi efectuado um ensaio de carga de placa. Para tal, utilizou-se um recipiente com cerca de 50cm de diâmetro, onde foi colocado solo compactado, de forma a simular um saibro compacto. Foi colocado o sensor construído no interior do solo compactado e posteriormente foi aplicada uma carga na zona central do solo.

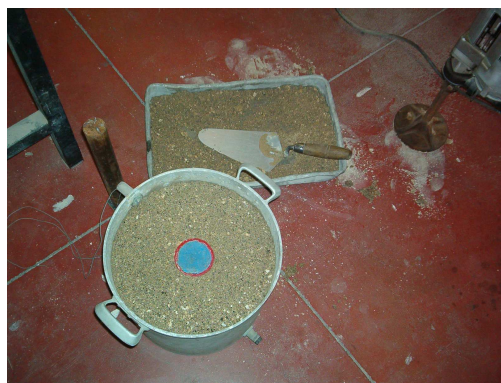


Figura 97 – Compactação do solo dentro do recipiente e colocação do sensor



Figura 98 – Montagem do equipamento para a realização do ensaio



Figura 99 – Sistema de aquisição de dados

## 8.6 RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizados os ciclos de carga indicados na figura 100.

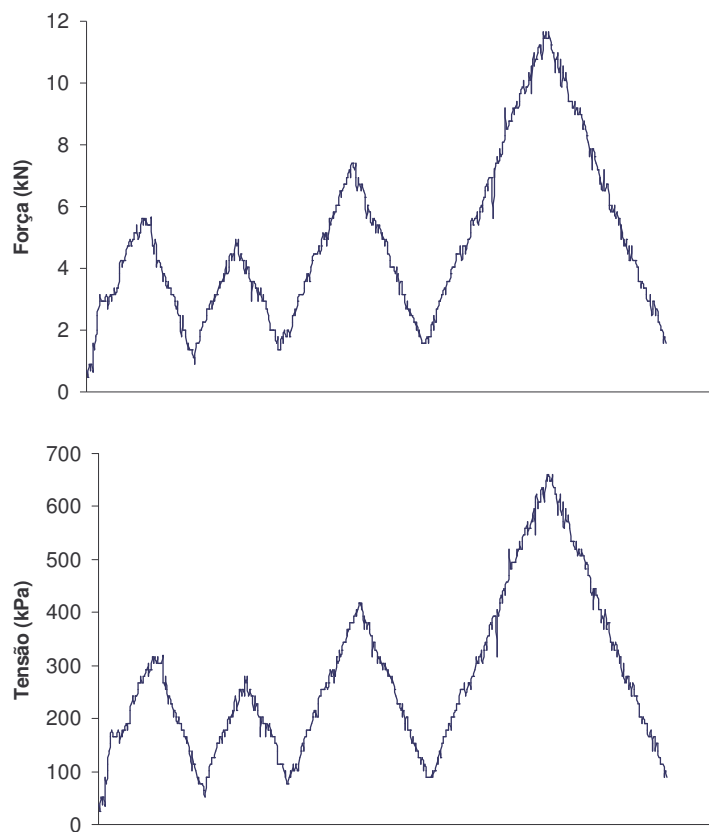


Figura 100 – Ciclos de carga realizados

Onde foram obtidos valores dos deslocamentos através de 3 LVDT's e o sensor colocado no interior do solo. A figura 101 apresenta os valores registados pelo sensor e LVDT's durante o ensaio.

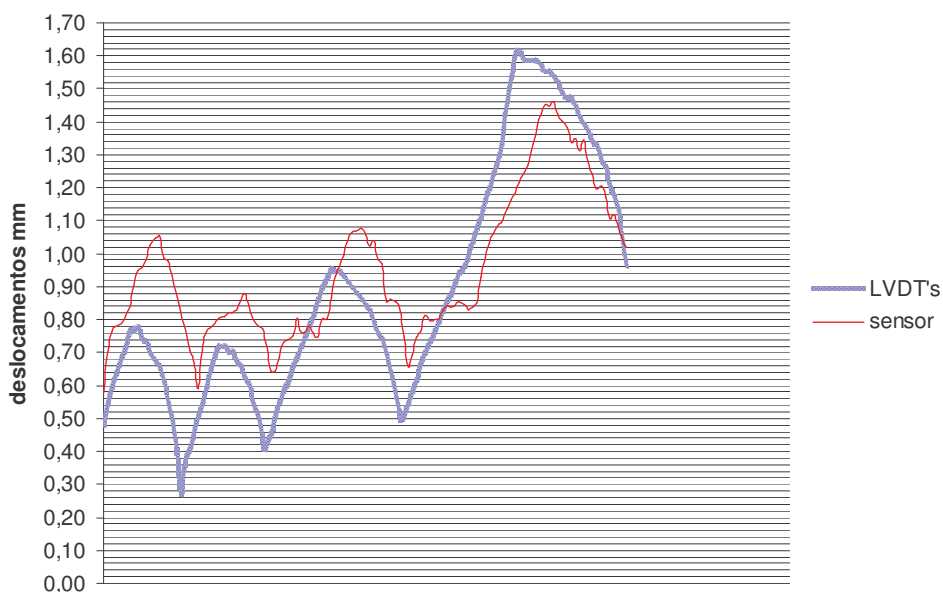


Figura 101 – Deslocamentos obtidos através dos LVDT's instalados e a partir do sensor construído

A resistência eléctrica do sensor foi convertida em deformação com base na expressão da figura 96.

## **8.7 CONCLUSÃO**

Verifica-se uma boa concordância entre as curvas registadas. O registo das deformações com base na calibração do sensor construído provou-se de fácil utilização.

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que o sensor construído permite com boa aproximação determinar a grandeza dos assentamentos ocorridos sob uma fundação de uma estrutura, para solicitações desta ordem de grandeza.

O material demonstrou aptidão para constituir um tipo de sensores robusto, fiável e de baixo custo. Carece, no entanto de mais ensaios, com diversos tipos de materiais e solicitações, assim como deverá ser analisada a influencia de factores como a temperatura e a humidade.

---

## CONCLUSÕES GERAIS

*capítulo nove*

## 9.1 CONCLUSÕES GERAIS

A partir do trabalho apresentado, é possível concluir que recorrendo à tecnologia disponível, é possível monitorizar uma série de parâmetros fundamentais para avaliar o desempenho de uma estrutura, quer ao nível do seu comportamento mecânico, quer ao nível da integridade e durabilidade dos materiais constituintes.

No entanto, devido aos custos e complexidade inerentes à implementação de um sistemas de monitorização, apenas em situações excepcionais e em obras de grande envergadura é que tais sistemas são instalados.

O uso generalizado da monitorização de estruturas poderá passar pelo recurso a materiais inteligentes. Estes materiais podem ser obtidos a partir de elementos introduzidos na composição de materiais correntes, ou mesmo unicamente recorrendo a materiais convencionais, através do estudo e conhecimento aprofundado de certas características tais como as propriedades eléctricas.

No âmbito deste trabalho, utilizou-se a resistividade/conductividade eléctrica do betão e argamassa, simples e reforçado com fibras de carbono para averiguar a possibilidade de monitorizar certos parâmetros.

Por tratar-se de uma variável que exerce grande influência sobre a resistividade, estabeleceu-se, com base na equação de Arrhenius, uma relação entre a temperatura e a condutividade eléctrica de provetes de argamassa simples e reforçada com fibras de carbono. Esta relação tem grande interesse, devido à possibilidade de converter um determinado valor de condutividade medido a uma determinada temperatura, para um valor de condutividade a uma temperatura qualquer. No entanto, demonstrou-se que esta relação é válida para temperaturas superiores a 0°C. para temperaturas mais baixas a relação muda uma vez que a mobilidade dos iões da fase líquida passa a ocorrer na fase sólida.

Estabeleceu-se uma relação entre resistência à compressão e a evolução da resistividade eléctrica do betão simples e reforçado com fibras de carbono (CFRC), de forma a permitir, com base no valor da resistividade eléctrica, estimar a tensão de rotura à compressão do material de forma não destrutiva. A aplicação de métodos consagrados, empíricos e teóricos para determinar a resistência do betão ao estudo da evolução da resistividade eléctrica do betão demonstra que a evolução destes dois

parâmetros estão fortemente interligados, sendo inclusive válido aplicar estes mesmo métodos para relacionar a idade do material com a sua resistividade eléctrica. Com base nestes métodos, é possível estimar a resistência à compressão do betão aos 28 dias, com base nas leituras de resistividade até aos 7 dias de idade, de forma não destrutiva.

Não foi possível estabelecer uma relação com aplicação prática entre a resistividade do betão e a concentração de cloretos existente no material. Tal relação seria de extrema utilidade para avaliar e diagnosticar a presença de cloretos em estruturas de betão armado e pré-esforçado de forma não destrutiva. No entanto, para os valores de concentração especificados nas normas em vigor, não se registaram oscilações significativas no valor da resistividade do material.

Com base nos ensaios *CTH – Rapid Method* efectuados, conclui-se que neste tipo de ensaios, o aumento da temperatura do provete causado pela passagem da corrente eléctrica deturpa o valor da resistividade do material e consequentemente o valor da intensidade da corrente que o atravessa. Por este motivo, sugere-se que o valor da intensidade da corrente e da resistividade do provete sejam corrigidos, de forma a anular o efeito causado pelo aumento de temperatura. Para tal, poderá utilizar-se a metodologia apresentada no capítulo 5.

Em todos os ensaios realizados, não foram encontradas diferenças significativas entre os provetes de betão/argamassa simples e betão/argamassa com fibras. A inclusão da fibra terá interesse no caso do material em serviço, onde a ocorrência de microfissuração poderá interromper a fase condutora, sendo neste caso assegurada a passagem de corrente através da fibra.

A conjugação de um material polimérico com as fibras de carbono resultou num material compósito com apetência para sensor. O comportamento elástico do sensor é assegurado pela parte polimérica que permite aproximar/afastar as fibras de carbono, a fase condutora, conforme o seu estado de deformação/tensão fazendo desta forma variar o valor da sua resistividade eléctrica.

A resistividade eléctrica é um parâmetro promissor que poderá ser de grande utilidade no desenvolvimento de meios não destrutivos para diagnosticar e caracterizar o estado de serviço dos materiais, de forma a tornar as construções cada vez mais

“inteligentes”. No entanto, dada a sua complexidade, este parâmetro carece ainda de maior investigação.

A construção de sensores robustos, de baixo custo e fiáveis poderá passar pela utilização de materiais poliméricos com fibras de carbono. Seria interessante estudar a aptidão deste tipo de sensores em vários tipos de situações, solicitações e meios, nas obras reais.

---

## REFERÊNCIAS

*capítulo dez*



## 10.1 REFERÊNCIAS

- [1] Akhras, G.; “*DES MATERIAUX INTELLIGENTS ET DES SYSTÈMES INTELLIGENTS POUR L’AVENIR*”, Revue Militaire Canadienne, 2000
- [2] A. E. Aktan ; M. Pervizpour ; N. Catbas ; K. Grimmelsman ; R. Barrish ; J Curtis and X. Qin ; “*INFORMATION TECHNOLOGY RESEARCH FOT HEALTH MONITORING OF BRIDGE SYSTEMS*”
- [3] Alexander, M. R.; Jones, F. R.; “*CARBON*”; 1995, 33, 569
- [4] Archie, G. E.; “*THE ELECTRICAL RESISTIVITY LOG AS AN AID IN DETERMINING SOME RESERVOIR CHARACTERISTICS*”; Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Vol. 146, pages 54 to 62, 1942
- [5] ASTM Standard C 1202 - 94; “*ELECTRICAL INDICATION OF CONCRETE ABILITY TO RESIST CHLORIDE ION PENETRATION*”
- [6] Baweja, D.; Roper, H and Sirivivatnanon, V.; “*CORROSION OF STEEL IN MARINE CONCRETE: LONG-TERM HALF-CELL POTENCIAL AND RESISTIVITY DATA*”; Proceedings, Fourth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concr
- [7] Beek, A. V.; “*DIELECTRIC PROPERTIES OF YOUNG CONCRETE*”; Delft University Press - 2000
- [8] Biniak, S.; Dzielendziak, B.; Siedlewski, J.; “*THE ELECTROCHEMICAL BEHAVIOUR OF CARBON FIBRE ELECTRODES IN VARIOUS ELECTROLYTES. DOUBLE-LAYER CAPACITANCE*”; Carbon; Vol. 33, pag 1255-1263, 1995
- [9] Bürchler, D.; Elsner, B. and Böhni, H.; “*ELECTRICAL RESISTIVITY AND DIELECTRIC PROPERTIES OF HARDENED CEMENT AND MORTAR*”; Institute of Materials Chemistry and Corrosion, Swiss federal Institute of Technology, 1996
- [10] Cabrera, J.G.; Ghoddoussi, P.; “*THE INFLUENCE OF FLY ASH ON THE RESISTIVITY AND RATE OF CORROSION OF REINFORCED CONCRETE*”; Proceedings, Fourth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, SP-170. p
- [11] Campilho, A. “*INSTRUMENTAÇÃO ELECTRÓNICA. MÉTODOS E TÉCNICAS DE MEDIÇÃO*”; FEUP Edições
- [12] Carvalho, J.; Gonçalves, L.; “*MONITORIZAÇÃO DA NOVA PONTE SOBRE O RIO AVE NA AUTO-ESTRADA BRAGA-GUIMARÃES*”; Projecto Individual da Licenciatura em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2001
- [13] Cruz, P.; “*A CONSERVAÇÃO E A REABILITAÇÃO DE PONTES*”; Jornadas de Engenharia Civil 2001, Universidade do Minho: pags 95 -120
- [14] Csöregi, E.; Gorton, L.; Marko-Varga, G.; “*CARBON FIBRES AS ELECTRODE MATERIALS FOR THE CONSTRUCTION OF PEROXIDASE-MODIFIED AMPEROMETRIC BIOSENSORS*”; Analytica Chimica Acta; Vol. 273, pag 59-70; 1983
- [15] Dayton, M. A.; Brown, J. C.; Stutts, K. J.; Wightman, R. M.; “*FARADAIC ELECTROCHEMISTRY AT MICROVOLTAMMETRIC ELECTRODES*”; Analytica Chimica Acta; Vol. 52, pag 946 - 950; 1980
- [16] Donnet, J. B.; Ehrburger, P.; “*CARBON*”; 1977, 15, 143; Fourdeux, A.; Herinckx, C.; Perret R. and Ruland W.; “*Compt. Rendus Acad. Sci.*”; 1969, 269C, 1597; Johnson , D. J. and Tyson, C. N.; “*Br. J. Appl. Phys. (J. Phys. D)*” 1969, 2, 789
- [17] E 372 (1993); “*ÁGUA DE AMASSADURA PARA BETÕES: CARACTERÍSTICAS E VERIFICAÇÃO DA CONFORMIDADE*”
- [18] Edmonds, T. E.; “*ELECTROANALYTICAL APPLICATIONS OF CARBON FIBRE ELECTRODES*”; Analytica Chimica Acta; Vol. 175 – pag 1-22; 1985
- [19] Ferreira, R.M.; “*AVALIAÇÃO DE ENSAIOS DE DURABILIDADE DO BETÃO*”, Universidade do Minho, 2000
- [20] Figueiredo A.; “*CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO*”; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- [21] Fricke, H.; “*A MATHEMATICAL TREATMENT OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND CAPACITY OF*

- DISPERSE SYSTEM. THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF A SUSPENSION OF HOMOGENEOUS SPHEROIDS*"; *Physic Review* – Vol. 24, 1924
- [22] G. S. T. Armer ; *"MONITORING AND ASSESSMENT OF STRUCTURES"*; 2001
- [23] Gardner, S. D.; Singanamsetty, C. S. K.; Booth, G. L.; He, Guo-Ren; Pittman, C. U.; *"SURFACE CHARACTERIZATION OF CARBON FIBERS USING ANGLE-RESOLVED XPS AND ISS"*; *Carbon*, Vol. 33, pag 587 - 595, 1995
- [24] Gjörv, O. E. ; Vennesland, Ø. and El-Busiady, A.H.S.; *"ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE IN THE OCEANS"*; 9th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1977
- [25] Gonzalez, J.; *"BETÕES REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO"*; Universidade do Minho, 1998
- [26] Guimarães, A.T.C. ; Helene, P.R.L. ; Quarcione, V.A. *"METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE MODELOS DE VIDA ÚTIL EM ESTRUTURA MARÍTIMA DE CONCRETO COM IDADE AVANÇADA"*; Teoria e Prática na Engenharia Civil, Nº 1, pag 67-76, Nov. 2000
- [27] Hammond, E. ; Robson, T.D.; *"COMPARISON OF ELECTRICAL PROPERTIES OF VARIOUS CEMENTS AND CONCRETES"*; *The Engineer*, Vol. 199, nº 5156, pages 78 to 80
- [28] Hammond, E.; Robson, T.D.; *"COMPARISON OF ELECTRICAL PROPERTIES OF VARIOUS CEMENTS AND CONCRETES"*; *The Engineer*, Vol. 199, Nº 5156, pages 78 to 80, 1955
- [29] Housner, G.W.; Bergman, L.A.; Caughey, T.K.; Chaasiakos, A.G.; Claus, R.O.; Masri, S.F.; Skelton, R.E.; Soong, T.T.; Spencer, B.F.; Yao, J.T.P.; *"STRUCTURAL CONTROL: PAST, PRESENT AND FUTURE"*, (Section 7, Health Monitoring) *Journal of Engineering Mechanic*
- [30] Huang, Y.; Young, R. J.; *"EFFECT OF FIBRE MICROSTRUCTURE UPON THE MODULUS OF PAN- AND PITCH-BASED CARBON FIBRES"*; *Carbon*; Vol. 33, pag 97 – 107, 1995
- [31] Hughes, B.P.; Soleit, A.K.O. and Brierly, R.W.; *"New Technique for Determining the Electrical Resistivity of Concrete"*; *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, Nº 133, p. 243 to 248, 1985
- [32] Hunkeler, F.; *"THE RESISTIVITY OF PORE WATER SOLUTION – A DECISIVE PARAMETER OF REBAR CORROSION AND REPAIR METHODS"*; *Construction and Building Materials*, Vol. 10, Nº 5, pages 381 a 389, 1996
- [33] Ishitani, A.; *"APPLICATION OF X-RAY PHOTOELECTRON SPECTROSCOPY TO SURFACE ANALYSIS OF CARBON FIBER"*; *Carbon*, Vol. 19, pag. 269 – 275, 1981
- [34] Jackson, P.D.; Taylor-Smith, D. and Stanford, P.N.; *"RESISTIVITY-POROSITY-PARTICLE SHAPE RELATIONSHIPS FOR MARINE SANDS"*; *Geophysics*, Vol. 43, pages 1250 to 1268, 1978
- [35] Keller, G.V.; *"ELECTRICAL PROPERTIES OF ROCKS AND MINERALS"*; *Handbook of Physical Properties of Rocks*, Vol. I, pages 217 to 293, 1982
- [36] Liedtke, V.; Huhinger, K. J.; *"MESOPHASE PITCHES AS MATRIX PRECURSOR OF CARBON FIBER REINFORCED CARBON: I. MESOPHASE PITCH PREPARATION AND CHARACTERIZATION"*; *Carbon*, Vol. 34, pag 1057 – 1066, 1996
- [37] Martins, F.; *"OBRAS GEOTÉCNICA"*; Universidade do Minho, 2001
- [38] Maxwell, C.; *"TREATISE ON ELASTICITY AND MAGNETISM"*; Vol. 1, Clarendon Press, Oxford, 1873
- [39] McNeill, J.D.; *"ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SOILS AND ROCKS"*; Technical Note TN-5, Geonics Ltd. 1980
- [40] Medeiros, M.; *"ESTUDO DE VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NAS MEDIDAS DE RESISTIVIDADE DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO"*; Engenharia Civil – U.M., número 12, 2001
- [41] Mochida, I.; Yoon, S.-H.; Takano, N.; Fortin, F.; Korai, Y.; Yokogawa, K.; *"CARBON"*; 1996, 34, 941
- [42] Monfore, G.E.; *"THE ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE"*; *Journal of the PCA research and Development Laboratories*, Vol. 10, nº 2, pages 35 to 48, 1968
- [43] Morelli, R. and Ford, M.C.; *"ELECTRICAL CONDUCTION THROUGH CONCRETE USING FORMATION FACTOR THEORIES"*; International Conference on Structural Faults and Repair, University of

- London, July 7-9, 1987, Engeneering Technics Press, Edinburgh, 1987 pages 411 to
- [44] Neves, R.; Gonçalves, A; “*INSPECÇÃO DO BETÃO NAS ESTRUTURAS*”
- [45] NP 1379 (1979); “*INERTES PARA ARGAMASSAS E BETÕES: ANÁLISE GRANULOMÉTRICA*”; IPQ
- [46] NP EN 197-1 (1991); “*CIMENTOS: DEFINIÇÕES, COMPOSIÇÃO, ESPECIFICAÇÕES E CRITÉRIOS DE CONFORMIDADE*”; IPQ
- [47] NP 954 (1973); “*INERTES PARA ARGAMASSAS E BETÕES: DETERMINAÇÃO DAS MASSAS VOLUMICAS E DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DE AREIAS*”; IPQ
- [48] NP ENV 206 (1993); “*BETÃO: COMPORTAMENTO, PRODUÇÃO, COLOCAÇÃO E CRITÉRIOS DE CONFORMIDADE*”; IPQ, 21 pp
- [49] Rasch, E.; Hinrichsen, F.W.; “*UBER EINE BESIEHUNG ZWISCHEN ELETRISCHER LEITFAHIGHEIT UND TEMPERATUR*”; Zeitschrift fur Electrochemie, Vol. 14, Nº 41, pages 41 to 48, 1908
- [50] Rooke, M. A.; Sherwood, P. M. H.; “*X-RAY PHOTOELECTRON SPECTROSCOPIC STUDY OF THE EFFECT OF ION ETCHING OF SILICON CARBIDE ON A CARBON FIBER*”; Carbon, Vol. 33, pag. 375 – 380, 1995
- [51] Salta, M. M. ; Pereira, E. V. ; “*MONITORIZAÇÃO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO*”
- [52] Savage, G.; “*CARBON-CARBON COMPOSITE*”; Chapman & Hall, London 1992
- [53] Schiessl, P. et al, “*CORROSION MONITORING SYSTEMS INSTALLED IN THE STRUCTURES OF THE GREAT-BELT-LINK-PROJECT-MONITORING AS PART OF A MULTI-BARRIER PROTECTION STRATEGY*”; in International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 1995, 109p
- [54] Slawinski, A.; “*CONDUCTIBILITÉ D’UN ELECTROLYTE CONTENT DES SPHERE DIELECTRIQUES*” ; Journal de Chimie Physique – Vol. 23, pages 45 to 61, 1937
- [55] Tabatabai, Habib; Rahman Adeeb; “*HEALTH MONITORING OF BRIDGE STRUCTURES AND COMPONENTS USING SMART-STRUCTURES TECNOLOGY*”
- [56] Tang, M. M.; Bacon, R.; “*CARBONIZATION OF CELLULOSE FIBERS—II. PHYSICAL PROPERTY STUDY*”; Carbon, Vol. 2, pag. 221 – 222, 1967
- [57] Vennesland, B. ; “*REPAIR OF CONCRETE STRUCTURES. FROM THEORY TO PRACTICE IN MARINE ENVIRONMENT*” ; Svolvaer, Norway, 28-30 May 1997, NPRA, 253 p
- [58] Whiting A., Nagi A.; “*ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE – A LITERATURE REVIEW*”
- [59] Whitting, H.W.; McCarter, J. and Forde, M.C., “*THE CONDUCTION OF ELECTRICITY THROUGH CONCRETE*”; Magazine og Concrete Research, Vol. 33, Nº 114, pages 48 to 60, 1981
- [60] Woei; “*THESIS IN PH.D.*”; University of New York at Buffalo, 1994
- [61] Wolsiefer, J.T.; “*SILICA FUME CONCRETE: A SOLUTION TO STEEL REINFORCEMENT CORROSION IN CONCRETE*”; International Conference on Durability of Concrete, SP-126, pages 527 to 553, American Concrete Institute, 1991
- [62] Xie, P.P.; Gu, Y. F. and Beaudoin, J.S.; “*DETERMINATION OF BLAST-FURNACE CONTENT IN HARDENED CONCRETE BY ELECTRICAL CONDUCTIVITY METHODS*”; Cement, Concrete, and Aggregates, CCAGDP, Vol 17, nº 1, june 1995, pages 79 to 83
- [63] “*HTTP://SIC.SAPO.PT/ARQUIVO/INDEX.PHP*”
- [64] “*HTTP://WWW.PARALAB.PT/EMPRESA.HTM*”
- [65] “*HTTP://WWW.SLOPEINDICATOR.COM/INDEX.HTML*”
- [66] “*HTTP://WWW.SMARTFIBRES.COM/NEWS.HTM*”